



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

**№2 (34) 2011**  
**(март-апрель)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГОУ 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:

**Гончаров Ю.И.** д.т.н., проф.  
**Колесникова Т.Н.** д. арх., проф.  
**Коробко В.И.** д.т.н., проф.

## Редколлегия:

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

## Ответственные за выпуск:

**Данилевич Д.В.** к.т.н., доц.  
**Солопов С.В.** к.т.н.

## Адрес редакции:

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

Зарегистрировано в Федеральной службе  
по надзору в сфере связи и массовых ком-  
муникаций. Свидетельство:  
ПИ № ФС77-35718 от 24 марта 2009 г.

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

© ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011

## Содержание

### Теория инженерных сооружений.

#### Строительные конструкции

- Алексейцев А.В., Серпик И.Н.** Оптимизация плоских ферм на основе генетического поиска и интеративной процедуры триангуляции..... 3
- Гречихин Л.И., Подлозный Э.Д.** Наноразмер рассматривания явления пенетрации стержней в сплошную среду..... 9
- Гриднев С.Ю.** Теоретический анализ натуральных измерений колебаний наплавного моста..... 17
- Клюева Н.В., Дорофеев А.А.** К оценке предельной глубины повреждения нагруженного и корродирующего бетона..... 25
- Коробко В.И., Морозов С.А.** Уравнение краевого шарнира текучести для пластинок линейно-переменной толщины..... 30
- Коробко В.И., Черняев А.А.** Определение основной частоты свободных колебаний равнобедренных треугольных пластинок с комбинированными граничными условиями с использованием отношения конформных радиусов..... 36
- Нежданов К.К., Жуков А.Н.** Исследование методов усиления консолей одноэтажных промышленных зданий..... 43
- Турков А.В., Геозков П.А.** Определение модуля упругости слоя составной балки по динамическим характеристикам конструкции..... 50

#### Архитектура и градостроительство

- Калинкина Н.А.** Зонирование территории Самары с целью размещения объектов среднего профессионального образования (СПО)..... 53

#### Строительные материалы и технологии

- Акчурина Т.К., Пушкаря А.А.** Формирование межфазного контакта полимерной композиции при химической гидроизоляции конструкций..... 57
- Готовцев В.М., Придатко Ю.М.** Закономерности формирования межфазных слоев в композиционных материалах с позиций теории Ван-дер-Ваальса..... 61
- Гулюмджян П.П., Коканин С.В., Пискунов А.А.** Исследование теплофизических свойств пенополистирола при его старении..... 69
- Конорев А.С., Николенко Д.А., Николенко М.А., Акулов В.В.** Оптимизация принимаемых решений при ремонте эксплуатируемых автомобильных дорог..... 76
- Коровкин М.О.** Исследование эффективности суперпластификатора С-3 в вяжущем низкой водопотребности..... 83
- Мизонов В.В., Ляпин А.А., Илиополов С.К., Углова Е.В., Тиратуриян А.Н.** Обратная задача об определении значений модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций..... 88
- Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Румянцева К.Е.** Антикоррозионная защита металлов в строительстве: проблемы и пути их решения..... 95
- Христофоров А.И., Христофорова И.А., Кузьмин Д.И.** Мелкозернистый бетон, модифицированный органическими соединениями Na<sup>+</sup>..... 102
- Чернов С.А.** Исследование устойчивости к старению комплексно-модифицирующих холодных асфальтобетонных смесей..... 108

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.

**№2 (33) 2011**  
**(March-April)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – Federal state 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:

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

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

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

## Editorial committee

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Responsible for edition:

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.

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

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

Journal is registered in Federal service on su-  
pervision in sphere of communication and  
mass communications

The certificate of registration:  
ПН № ФС77-35718 from 24.03.09

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2011

## Contents

### *Theory of engineering structures.*

#### *Building units*

- Alekseytsev A.V., Serpik I.N.** Optimization of plane trusses on the basis of genetic algorithm and iterative procedure of triangulation..... 3
- Hrechikhin L.I., Podlozny E.D.** Nanolevel of consideration of the phenomenon of a penetration of cores in the continuous environment..... 9
- Gridnev S.Yu.** The theoretical analysis of naturel measurements of fluctuations of the floating bridge..... 17
- Klyueva N.V., Dorofeyev A.A.** To the estimation of limiting damaging depth in loaded and corrosive concrete..... 25
- Korobko V.I., Morozov S.A.** The equation of the regional hinge of fluidity for plates of the linearly-variable thickness..... 30
- Korobko V.I., Chernyev A.A.** The definition of the basic frequency free vibrations of isosceles triangles plates with combined boundary conditions with use of the relation of conformal radiuses..... 36
- Nezhdanov K.K., Zhukov A.N.** Research methods of one storey industrial buildings cantilevers reinforcement..... 43
- Turkov A.V., Gvozdkov P.A.** Definition of the module of elasticity of the layer of the compound beam on design dynamic characteristics..... 50

### *Architecture and town-planning*

- Kalinkina N.A.** Samara region zoning for allocation of secondary vocational training institutions..... 53

### *Construction technologies and materials*

- Akchurin T.K., Pushkarskaya A.A.** Interphase formation contact polymer composition for chemical waterproofing of structures..... 57
- Gotovtzev V.M., Pridatko Yu.M.** Laws of formation of interface layers in composite materials from the point of view of Van der Waals'theory..... 61
- Guyumdzhyan P.P., Kokanin S.V., Piskunov A.A.** Thermal properties of foam polystyrene at its ageing research..... 69
- Konorev A.S., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A., Akulov V.V.** Optimization of accepted decisions at repair of maintained highways..... 76
- Korovkin M.O.** Study of the effectiveness of superplasticizer C-3 in binders with a low water requirement..... 83
- Mizonov V.V., Ljapin A.A., Ilioplov S.K., Uglova E.V., Tiraturjan A.N.** Return problem about definition of values of modules of elasticity of layers of maintained road designs.. 88
- Fedosov S.V., Roumyantseva V.Ye., Fedosova N.L., Roumyantseva K.Ye.** Anticorrosive protection of metals in building: problems and ways of their decision..... 95
- Hristoforov A.I., Hristoforova I.A., Kuzmin D.I.** Fine-grained concrete modified organic connections Na<sup>+</sup>..... 102
- Chernov S.A.** Issledovanie resistance to aging complex modified cold asphalt mixtures 108

Journal is included into the List of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОСКИХ ФЕРМ НА ОСНОВЕ  
ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА И ИТЕРАТИВНОЙ  
ПРОЦЕДУРЫ ТРИАНГУЛЯЦИИ**

*Разработана вычислительная схема оптимизации плоских ферм путем сочетания эволюционного моделирования и триангуляции, удовлетворяющей условию Делоне. В генетической итерационной процедуре ведется поиск профилей стержней и координат узловых точек с использованием многоточечных операторов кроссинговера и мутации. Топология фермы представляется в виде неориентированного графа, описываемого множеством узлов и ребер. Граф строится с помощью простой итеративной триангуляции на множестве заданных узлов. Приведен пример, иллюстрирующий работоспособность предлагаемого подхода к оптимальному синтезу шарнирно-стержневых систем.*

***Ключевые слова:** плоские фермы, оптимизация, топологический синтез, генетические алгоритмы, триангуляция.*

При решении задач оптимизации шарнирно-стержневых строительных конструкций могут использоваться генетические алгоритмы [1, 2]. При этом топологический синтез несущей системы обычно предусматривает введение избыточных структур. Существенным недостатком такого подхода является введение неоправданных ограничений на положение узлов ферм. В настоящей статье предлагается вычислительная схема эволюционной оптимизации плоских ферм с формированием топологии конструкции путем триангуляции на базе простой итерационной схемы [3, 4], что позволяет существенно расширить возможности выбора геометрии деформируемых систем.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Рассмотрим задачу синтеза плоской стальной строительной фермы по критерию минимума объема материала стержней:

$$V(N, X, Y, T) \rightarrow \min ,$$

где  $N$  – число узлов множества  $C_1$ , положения которых выбирается в процессе оптимизации;  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  – множества координат узлов  $C_1$  в декартовой системе осей  $Oxy$ ;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$  – множество допустимых для выбора профилей каждого из стержней фермы;  $M$  – число рассматриваемых типоразмеров профилей стержней.

Учитываются следующие ограничения:

1. Предельные контуры очертаний верхнего и нижнего поясов фермы.
2. Положение узлов множества  $C_2$ , координаты которых не изменяются.
3. Геометрическая неизменяемость системы.
4. Условие равновесия узлов конечно-элементной модели фермы.
5. Условия прочности и устойчивости стержней в соответствии с положениями СНиП II-23-81\*, условие жесткости конструкции по СНиП 2.01.07-85\*.
6. При построении топологии фермы используются триангуляции, удовлетворяющие условию Делоне [4]: внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не должна попадать ни одна из вершин, не принадлежащая этому треугольнику. Это ограничение позволяет исключать из рассмотрения структуры ферм с пересекающимися стержнями и не допускать появления треугольников с малыми углами.
7. Общая устойчивость конструкции.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ОПТИМИЗАЦИИ

Выполняем декомпозицию задачи, отдельно проводя оптимизацию для каждого из нескольких значений  $N$ . После этого можно выбрать результат оптимального синтеза с наименьшим полученным объемом  $V$ . Общая схема оптимизации представлена на рисунке 1.

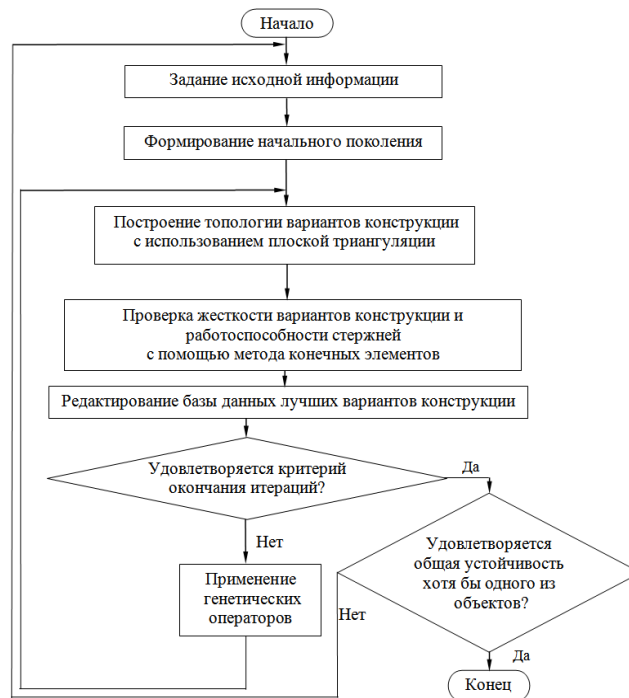


Рисунок 1 – Блок-схема процесса оптимизации

Каждый вариант фермы трактуем как особь, набор генов которой определяется значениями ее параметров  $X$ ,  $Y$ ,  $T$ . При этом число стержней для заданного  $N$  является фиксированным, а топология фермы с учетом ограничения б определяется расположением узлов множеств  $C_1$  и  $C_2$ . В качестве критерия выживаемости рассматривается значение  $V$ . Чем меньше  $V$ , тем выживаемость для объектов, удовлетворяющих поставленным ограничениям, считается более высокой. Ограничения 1-6 считаются активными. Общая устойчивость конструкции трактуется как пассивное ограничение. Его проверка выносится за пределы процедуры оптимального синтеза. Поясним содержание приведенных на рисунке 1 блоков.

**Задание исходной информации.** Формируются данные об узлах  $C_2$ , допустимых значениях координат узлов  $C_1$ , закреплениях, рассматриваемых вариантах нагружения, множествах допустимых значений для профилей стержней фермы, ограничениях по прочности и устойчивости стержней, ограничениях по жесткости конструкции.

**Формирование начального поколения.** Для каждой из  $Q$  особей в поколении случайным образом выбираются значения параметров  $X$ ,  $Y$  и  $T$ .

**Построение топологии вариантов конструкции с использованием плоской триангуляции.** Структура фермы представляется в виде неориентированного графа  $G(C, U)$ , заданного множеством вершин  $C = C_1 + C_2$  и ребер  $U$ . Внутренними областями графа являются треугольники. Ребра определяют положение стержней фермы.

Введем вспомогательную структуру, в которой могут располагаться узлы  $C_1$  (рисунок 2). Границу области  $D_0$  этой структуры образует ломаная линия  $L$ , на вершинах которой расположены узлы  $C_2$  и множества  $C_3$ , не используемого в графе  $G(C, U)$ . Узлы конструкции, в которых задаются опорные связи, включаются в множество  $C_2$ . Область  $D_0$  разбивается сеткой  $S$  на прямоугольники и треугольники  $\Pi$ , в каждом из которых может располагаться по одному из узлов  $C_1$ .

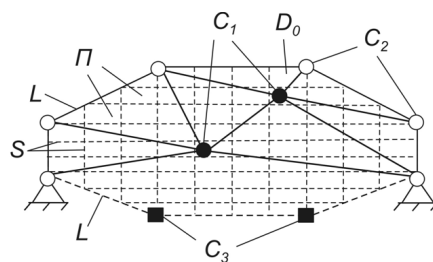


Рисунок 2 – Пример образования вспомогательной структуры и системы треугольников при задании двух узлов множества  $C_1$

Используем простой итерационный алгоритм триангуляции [4], в который для рассматриваемой задачи включим следующие процедуры:

1. Из множества  $C_2$  выбираются два соседних узла таким образом, чтобы сумма расстояний от этих узлов до какого-либо узла множества  $C_1$  была минимальной. На данных трех узлах строится первый треугольник.

2. Организуется цикл, на каждом шаге которого строится новый треугольник. При этом на очередном шаге выбирается еще неиспользованный в триангуляции узел множества  $C_1$ , который имеет наименьшую сумму расстояний до каких-либо двух узлов уже построенных треугольников. Полученные узлы принимаются в качестве вершин добавляемого треугольника.

3. Выполняется ряд шагов, связанных с достраиванием сетки. На каждом таком шаге реализуется перебор узлов  $C_2$ , еще не использованных ни в одном из полученных треугольников, и выбирается тот узел, который является ближайшим к стороне треугольника, лежащей на границе области триангуляции. Данный узел и два узла этой стороны принимаются для построения треугольника. Шаги завершаются, когда во множестве  $C_2$  не остается узлов, не связанных с треугольниками.

4. Для всех треугольников полученной триангуляции проверяется условия Делоне. Если данное условие выполняется, то вариант конструкции используется для дальнейшего анализа. Если условие не выполняется, то реализуется перестроение части триангуляции путем операции «флипа» [4]. Для этого анализируется каждая пара треугольников с общей стороной. Два соседних треугольника, не удовлетворяющие условию Делоне, заменяются парой с новым общим ребром. Если при всех перестроениях условие Делоне для одного или нескольких треугольников еще не удовлетворено, то формируется другая триангуляция с выбором новых положений узлов  $C_1$  на основе генетических операторов, реализуемых в данном блоке, и переходом к этапу 1.

5. Вариант конструкции, удовлетворяющий критерию Делоне, подвергается проверке по условию геометрической неизменяемости стержневой системы путем оценки определителя матрицы жесткости ее конечно-элементной модели. Если система является изменяемой, выполняется формирование новой триангуляции аналогично этапу 4.

Построение триангуляций продолжается до тех пор, пока не будет получен вариант геометрически неизменяемой конструкции со структурой, состоящей из треугольников, для каждого из которых выполнено условие Делоне.

*Проверка жесткости вариантов конструкции и работоспособности стержней с помощью метода конечных элементов.* Выполняется расчет напряженно-деформированного состояния каждого варианта конструкции для заданных сочетаний нагрузок. Если вариант конструкции не удовлетворяет активным ограничениям, то он исключается из рассмотрения. Если при исключении какого-либо объекта в базе данных лучших проектов имеется особь, еще не использованная в поколении, то она принимается для замены исключаемой особи. В противном случае формируется новый вариант конструкции, который также рассчитывается на прочность, жесткость и устойчивость.

*Редактирование базы данных лучших вариантов конструкции.* Каждая работоспособная особь в поколении проверяется по двум критериям: существует ли такая особь в базе данных элитных конструкций и не превышает ли объем  $V$  этой особи объем варианта конструк-

ции в базе с наихудшим критерием выживаемости. При обоих отрицательных ответах данная особь помещается в базу. Если число особей в ней превышает некоторую максимально допустимую величину, то особь с наибольшим объемом исключается из базы.

*Проверка удовлетворения критерию окончания итераций.* Многочисленные расчеты показывают, что при оптимальном проектировании шарнирно-стержневых систем с помощью представляемого алгоритма отсутствие изменения в базе данных лучших вариантов конструкций в течение 200 поколений говорит о целесообразности остановки оптимизации. Дальнейшее продолжение итерационного процесса обычно не приводит к сколько-нибудь существенному изменению наиболее рациональных проектов. Поэтому данный критерий принят нами к использованию.

*Применение генетических операторов.*

1) *Селекция.* Последовательно выбираются  $Q/2$  пар особей из текущего поколения стохастической схемой с перемещением (методом рулетки) [2] в зависимости от объема  $V$ . При этом каждой  $i$ -й особи на окружности единичной длины отводится дуга, длина которой  $l_i$  определяется значением  $V$ . Величину  $l_i$  вычисляем таким образом:

$$l_i = \frac{\Theta_i}{\sum_{i=1}^Q \Theta_i},$$

где  $\Theta_i = (\alpha V_i)^{-I}$ ;  $\alpha$  – константа;  $V_i$  – значение  $V$  для  $i$ -го варианта конструкции;  $I$  – некоторое натуральное число.

В работе [2] рекомендуется принимать  $Q = 20$ ,  $\alpha = 10$ ,  $I = 2$ . В процессе селекции мы не допускаем повторного попадания особи в пару. В то же время одна особь имеет возможность попасть в несколько пар.

2) *Двухточечная мутация.* Случайным образом для каждого выбранного при селекции варианта конструкции могут изменяться по два параметра.

3) *Трехточечный кроссинговер.* Случайным образом в каждой выбранной паре особей определяются три точки разреза. Далее осуществляется обмен параметрами по известной схеме генетических алгоритмов [2].

*Проверка обеспечения общей устойчивости.* Анализируется общая устойчивость для объектов, вошедших в базу данных лучших вариантов конструкции. Результат считается отрицательным, если ни один из проверяемых вариантов конструкции не удовлетворяет этому ограничению.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим оптимальный синтез плоской двухопорной фермы. Считалось, что узлы фермы закреплены от перемещений из ее плоскости. Вводилось 5 узлов множества  $C_2$  (рисунок 3). В узлах 1 и 5 принимались шарнирно-неподвижные связи. Узлы 2-4 загружались сосредоточенными силами  $P$ . Задавалось:  $L=101,6$  см;  $H=76,2$  см;  $P=88,964$  кН; материал стержней – сталь 09Г2 (С345); модуль упругости материала  $E = 2,06 \cdot 10^6$  МПа.

Для фиксированного  $N$  варьировались координаты узлов  $C_1$  и профили стержней, имеющих постоянное по длине сечение. Область  $D_0$  разбивалась при помощи равномерной сетки  $S$  с шагом  $L/3$  по горизонтали и  $H/3$  – по вертикали. Для каждого из стержней допускались для выбора следующие профили квадратных труб по ГОСТ 8639-82: 1)  $20 \times 2$ ; 2)  $30 \times 3$ ; 3)  $40 \times 3$ ; 4)  $50 \times 3$ ; 5)  $60 \times 4$ ; 6)  $80 \times 4$ ; 7)  $100 \times 6$ ; 8)  $120 \times 6$ . Напряжения в стержнях ограничивались величиной 345 МПа. Вертикальное перемещение каждого из узлов не допускалось более 2,66 см, что удовлетворяет требованиям СНиП 2.01.07-85\* по условию жесткости конструкции. Ограничения по устойчивости стержней учитывались в соответствии со СНиП II-23-81\*. Условия симметрии конструкции заранее не устанавливались. Тем не менее, наиболее рациональные системы получились симметричными.

Рассматривалось введение одного, двух и трех узлов  $C_1$ . При  $N=1$  получилась ферма, показанная на рисунке 4, а, где указаны номера рациональных типоразмеров профилей труб в заданной системе нумерации. Размер  $h_1 = 41,6$  см. Объем  $V$  составил 8336,69 см<sup>3</sup>.

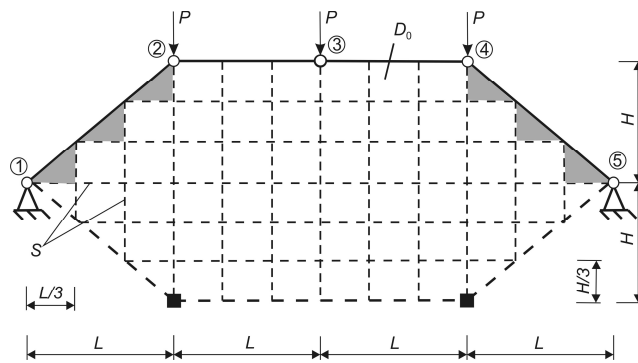


Рисунок 3 – Область  $D_0$ , кинематические условия и нагружение для проектируемой фермы

Для случая задания двух узлов  $C_1$  решение представлено на рисунке 4, б. Определены следующие размеры:  $x_1 = 101,6$  см,  $h_2 = 42,8$  см. Объем  $V=4799,86$  см<sup>3</sup>.

На рисунке 4, в-г приведены два наилучших решения, полученные для трех узлов  $C_1$ . Здесь  $x_2 = 100,5$  см;  $x_3 = 101,7$  см;  $h_3 = 42,2$  см;  $h_4 = 36,6$  см;  $h_5 = 39,5$  см;  $h_6 = 44,5$  см. Для фермы, показанной на рисунке 4, в,  $V=4129,59$  см<sup>3</sup>, на рисунке 4, г –  $V=4125,1$  см<sup>3</sup>.

Все решения найдены не более чем за 250 итераций генетического алгоритма.

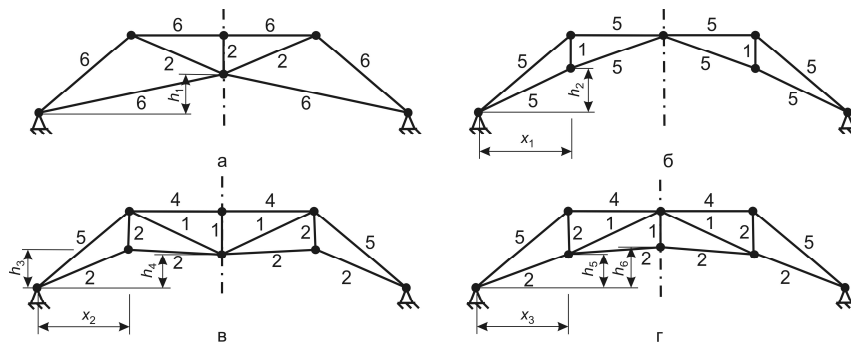


Рисунок 4 – Результаты решения задачи оптимального синтеза фермы: а – при  $N=1$ ; б – при  $N=2$ ; в, г – при  $N=3$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана вычислительная схема оптимального структурно-параметрического синтеза плоских ферм, не требующая формирования избыточных структур. При этом значительно расширяются возможности для поиска эффективных топологий формируемых конструкций. Предлагаемая поисковая стратегия основана на сочетании генетического алгоритма и итеративной процедуры триангуляции. Рассмотренный пример синтеза двухопорной фермы иллюстрирует работоспособность данного подхода к оптимизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серпик, И.Н. Структурно-параметрическая оптимизация стержневых металлических конструкций на основе эволюционного моделирования [Текст] / И.Н. Серпик, А.В. Алексейцев, Ф.Н. Левкович и др. // Известия вузов. Строительство. – 2005. – №8. – С. 16-24.
2. Серпик, И.Н. Генетические алгоритмы оптимизации металлических строительных конструкций: Монография [Текст] / И.Н. Серпик, А.В. Алексейцев, А.А. Лелетко // Под общ. ред. И.Н. Серпика – Брянск: БГИТА, 2010. – 187 с.
3. Скворцов, А.В. Применение триангуляции для решения задач вычислительной геометрии [Текст] / А.В. Скворцов, Ю.Л. Костюк // Геоинформатика. Теория и практика. – Томск: Том. ун-т, 1998. – Вып. 1. – С. 127-138.
4. Скворцов, А.В. Триангуляция Делоне и ее применение [Текст] / А.В. Скворцов. – Томск: Том. ун-т, 2002. – 128 с.
5. Balling, R. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm [Text] / R. Balling, R. Briggs, K. Gillman // Journal of Structural Engineering. ASCE. – 2006. – Vol. 132. – P. 1158-1165.



6. Su, R. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique [Text] / R. Su, L. Gui, Z. Fan // Proceedings of the World Congress on Engineering. July 1 – 3, London, U.K. – 2009. – Vol. 2. – P. 45-56.

**Алексейцев Анатолий Викторович**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика»  
Тел.: +7 (4832)-69-32-54, +7 960-564-33-58  
E-mail: aalexw@mail.ru

**Серпик Игорь Нафтольевич**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика»  
Тел.: +7 (4832)-64-88-00, +7 910-337-46-81  
E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

---

ALEKSEYTSEV A.V., SERPIK I.N.

**OPTIMIZATION OF PLANE TRUSSES ON THE BASIS  
OF GENETIC ALGORITHM AND ITERATIVE  
PROCEDURE OF TRIANGULATION**

*The computing circuit for optimization of plane trusses by the combination of the evolutionary modeling and triangulation that satisfies the Delaunay condition is developed. In the genetic iterative procedure, the search of the rod cross section and node coordinates is executed with use of the multi-point crossover and mutation operators. The topology of the plane trusses is represented as an undirected graph that is described with set of nodes and edges. The graph is constructed by implementing of a simple iterative algorithm of triangulation on set of given nodes. It is presented an example that illustrates the efficiency of the offered approach to optimization of hinged-rod systems.*

**Keywords:** plane trusses, optimization, topological synthesis, genetic algorithms, triangulation.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Serpik, I.N. Strukturno-parametricheskaja optimizacija sterzhnevyyh metallicheskih konstrukcij na osnove jevoljucionnogo modelirovaniya [Tekst] / I.N. Serpik, A.V. Aleksejcev, F.N. Levkovich i dr. // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 2005. – №8. – S. 16-24.
2. Serpik, I.N. Geneticheskie algoritmy optimizacii metallicheskih stroitel'nyh konstrukcij: Monografija [Tekst] / I.N. Serpik, A.V. Aleksejcev, A.A. Leletko // Pod obsch. red. I.N. Serpika – Brjansk: BGITA, 2010. – 187 s.
3. Skvorcov, A.V. Primenenie trianguljacii dlja reshenija zadach vychislitel'noj geometrii [Tekst] / A.V. Skvorcov, Ju.L. Kostjuk // Geoinformatika. Teorija i praktika. – Tomsk: Tom. un-t, 1998. – S. 127-138.
4. Skvorcov, A.V. Trianguljacija Delone i ee primenenie [Tekst] / A.V. Skvorcov. – Tomsk: Tom. un-t, 2002. – 128 s.
5. Balling, R. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm [Text] / R. Balling, R. Briggs, K. Gillman // Journal of Structural Engineering. ASCE. – 2006. – Vol. 132. – P. 1158-1165.
6. Su, R. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique [Text] / R. Su, L. Gui, Z. Fan // Proceedings of the World Congress on Engineering. July 1 – 3, London, U.K. – 2009. – Vol. 2. – P. 45-56.

**Alekseytsev Anatoly Viktorovich**

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk  
Candidate of technical science, associate professor of department «Mechanic»  
Ph.: +7 (4832) 69-32-54, +7 960 564 33 58  
E-mail: aalexw@mail.ru

**Serpik Igor Naftolevich**

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk  
Doctor of technical science, professor, head of department «Mechanic»  
Ph.: +7 (4832) 64-88-00, +7 910 337 46 81  
E-mail: iserpik@online.debryansk.ru



ГРЕЧИХИН Л.И., ПОДЛОЗНЫЙ Э.Д.

## НАНОУРОВЕНЬ РАССМОТРЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ ПЕНЕТРАЦИИ СТЕРЖНЕЙ В СПЛОШНУЮ СРЕДУ

*Разработана физико-математическая модель взаимодействия вводимого стержня с частицами окружающей среды в процессе его пенетрации на атомно-молекулярном уровне с переходом на наноуровень и затем на макроуровень. Определено значение энергии связи между частицами материала сплошной среды, в котором движется стержень. Найдены величины усилия, которые следует приложить к стержню, чтобы стержень не разрушался и входил в сплошную среду с максимальной скоростью. Экспериментально найдена оптимальная скважность передаваемых усилий электровибратором на вводимый стержень, обеспечивающий максимальную эффективность реализуемой пенетрации.*

**Ключевые слова:** стержень, частица, пенетрация, нанокластер, энергия связи.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пенетрация стержней в сплошную среду используется при строительстве крупных сооружений, в мостостроении, в гидротехническом и энергетическом строительстве. Используемые при этом технологии отработывались многие годы чисто опытным путем с теоретическим обоснованием на макроуровне с использованием моделей, в которых учитывались только некоторые характерные интегральные явления, возникающие в процессе пенетрации стержней в различные грунты. Конкретные явления, возникающие в процессе взаимодействия вводимых в грунт стержней на атомно-молекулярном уровне, не учитывались. В результате различные модели, применяемые для анализа процесса пенетрации, не позволяли адекватно отображать реальную картину взаимодействия. Это в свою очередь не позволило правильно организовывать конкретную технологию пенетрации стержней в грунты различного состава.

Прежде чем начинать строительство того или иного объекта производится геологическая разведка. По этим данным следует реализовать свою технологию пенетрации, предварительно осуществив компьютерное моделирование с целью отработки оптимальной технологии применительно к данному объекту строительства. Однако компьютерное моделирование невозможно осуществить без физико-математического обоснования процессов взаимодействия вводимого стержня в среду различного состава.

В этой связи возникает цель: разработать физико-математическую модель взаимодействия вводимого стержня с частицами окружающей среды в процессе его пенетрации на атомно-молекулярном уровне с переходом на наноуровень и только затем на макроуровень и на этой основе определить основные требования к технологии пенетрации в заданную среду с максимальной эффективностью и минимальными экономическими затратами.

Поставленная цель ставит следующие задачи:

- определить величину энергии связи между частицами материала, в котором движется стержень;
- выяснить какой величины усилия следует приложить к стержню, чтобы стержень не разрушался и входил в сплошную среду с максимальной скоростью;
- найти оптимальную скважность передаваемых усилий на вводимый стержень, обеспечивающий максимальную эффективность реализуемой пенетрации.

В настоящей работе последовательно рассмотрим, каким образом может быть достигнута поставленная цель путем решения поставленных задач с учетом кластерного строения материалов на наноуровне.

### ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ЗЕМНЫХ ПЛАСТОВ

Самые распространенные сложные земные пласты (песок, глина, известняк, гнейсы и др.) содержат кристаллы кварца, полевого шпата и слюды. В состав полевых шпатов, кроме

оксидов кремния и алюминия, входят оксиды калия, натрия и кальция. Обычный полевой шпат содержит оксид калия ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ) и известен под названием ортоклаз. Ортоклаз, разлагаясь под воздействием воды, превращается в алюмосиликат, известный под названием каолин ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ ). Чистый каолин встречается сравнительно редко и содержится в связанном состоянии в горных породах и в различных глинах, составляя их основу. Чтобы определить механические свойства различных глин и горных пород, необходимо выяснить структуру каждой из молекул, входящих в каолин, какие они образуют кластерные структуры и как эти кластерные структуры взаимодействуют друг с другом.

Ниже рассмотрим, как кластерные образования кремнезема ( $SiO_2$ ) и глинозема ( $Al_2O_3$ ) взаимодействуют между собой, образуя каолин.

Взаимодействие кластера глинозема с кластерной решетчатой структурой кремнезема обусловлено связями валентного электрона кластера  $Al_2O_3$  с диполем молекулы  $SiO_2$ , а также кластера  $SiO_2$  с диполем молекулы  $Al_2O_3$ . В обоих случаях результирующая энергия связи формируется шестнадцатью парами максимального дипольного взаимодействия. Бинарное взаимодействие в горизонтальном направлении составляет  $E_{e-д} = 0,101 + 0,106 = 0,207$  эВ, а результирующая связь на один кластер  $Al_2O_3 - 3,312$  эВ [1].

В вертикальном направлении взаимодействуют только кластеры  $Al_2O_3$  друг с другом. При этом включаются взаимодействия типа электрон-диполь (0,107 эВ) и диполь-диполь (0,156 эВ). Результирующее бинарное взаимодействие равно 0,263 эВ, а результирующая энергия связи на один кластер составит 2,104 эВ. Общая энергия связи на один кластер глинозема составляет 5,416 эВ.

По мере разогрева каолина вначале разрушается связь кластеров глинозема с кластерной решетчатой структурой кремнезема в горизонтальном направлении при температуре 2400 К, а затем полное разрушение твердого тела происходит при температуре 3050 К, когда разрываются связи в вертикальном направлении. Поэтому при рассмотрении процесса разрушения гранитных пород следует учитывать максимальное значение энергии связи между частицами в вертикальном направлении, т.е. бинарную связь между кластерами глинозема в кластерной решетчатой структуре кремнезема.

Потенциал взаимодействия в этом случае представляется в виде:

$$U(R) = \frac{ep_3}{4\pi\epsilon_0(R+R_1)^2} + \frac{2p_3^2}{4\pi\epsilon_0(R+R_2)^3}, \quad (1)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – расстояние между кластером и молекулой, а также между молекулами внутри кластера соответственно;  $p_3$  – дипольный электрический момент молекулы  $Al_2O_3$ ;  $e$  – заряд электрона;  $R$  – расстояние между кластерами в процессе деформации. Потенциал, определяемый по формуле (1), соответствует расстоянию больше равновесного.

Потенциал для расстояния меньше равновесного следует аппроксимировать формулой Морза с учетом того, что потенциал вида (1) на равновесном расстоянии должен сшиваться с формулой Морза. Тогда [1]:

$$U(R) = D_e [1 - \exp(-\beta(R - R_0))]^2 - D_e. \quad (2)$$

Здесь  $\beta = 2\pi\nu_e \sqrt{\frac{M}{2D_e}}$  и в свою очередь  $\nu_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$  – основная частота колебания кластера,

$k = \frac{gradU(R)}{R - R_0}$  – коэффициент упругости, а  $M$  – масса кластера,  $D_e$  – энергия связи бинарного взаимодействия кластеров  $Al_2O_3$ . Результирующий потенциал бинарного взаимодействия кластеров  $Al_2O_3$  в вертикальном направлении приведен на рисунке 1.

Пунктиром на рисунке 1 отмечен уровень энергии колебания кластера  $Al_2O_3$  при температуре 298 К. Этот уровень энергии соответствует относительной деформации растяжения  $\Delta/l$  равной 1,2%. При такой деформации скальные породы полностью разрушаются.

Для правой ветви результирующего потенциала бинарного взаимодействия кластеров  $Al_2O_3$  модуль Юнга определяется по формуле [1]:

$$E = \frac{U(R) - U(R_0)}{Sde^2}, \quad (3)$$

где  $e$  – относительная деформация;  $S$  – площадь молекулы  $Al_2O_3$  и  $d$  – расстояние между взаимодействующими молекулами. В горизонтальном направлении он составляет  $\sim 22$  ГПа, а в вертикальном направлении  $\sim 3,76$  ГПа. Полученные значения модуля Юнга относятся к сжатию.

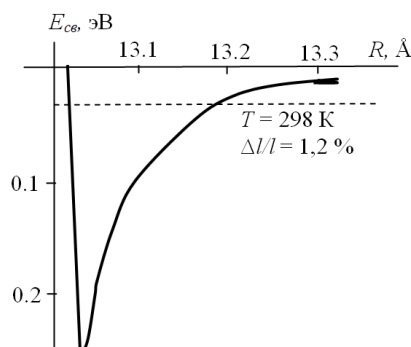


Рисунок 1 – Потенциал взаимодействия кластеров  $Al_2O_3$  в вертикальном направлении

Величина относительной деформации, которой соответствует энергия связи, равная энергии колебательного движения в нормальных условиях, равна  $4,65 \cdot 10^{-4}$ . На основании закона Гука давление, при котором произойдет разрыв бинарной связи между кластерами  $Al_2O_3$  в процессе сжатия в горизонтальном направлении, составляет 10,2 МПа (критическое давление), а в вертикальном направлении – 1,75 МПа. Если подействовать на земной пласт давлением большим, чем критическое, то такой пласт будет разрушен. Давления, большие критического 1,75 МПа, получают путем удара о пласт упрочненным наконечником стержня.

### ПАРАМЕТРЫ УДАРА СТЕРЖНЯ О ГРУНТ

Свая-оболочка, которая используется в процессе пенетрации, представляет собой полую цилиндрическую железобетонную конструкцию толщиной стенки ножа  $\sim 2$  см. Наконечники сваи изготовлены из прочной стали. Внутренний диаметр сваи – оболочки 1,076 м, а вес всей конструкции  $\sim 10$  т. Электровибратор мощностью 100 кВт при частоте вращения 408 об./мин. обеспечивал силу удара 445 кН. Давление в момент удара о грунт составляет:

$$P_0 = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d \Delta r} = \frac{4,45 \cdot 10^5}{\pi \cdot 1,076 \cdot 0,02} = 6,58 \cdot 10^6 \text{ Па.} \quad (4)$$

Общая схема воздействия стержня на грунт показана на рисунке 2. Мотор 4 вращает эксцентрики 3, которые осуществляют колебания сваи с амплитудой  $h$  в вертикальном направлении. Упрочняющие прокладки 6 демпфируют разрушение железобетонной конструкции сваи – оболочки 2.

В момент удара сваи о грунт в нем возникает ударная волна цилиндрической формы. При распространении по грунту интенсивность ударной волны падает обратно пропорционально радиусу, т.е.:

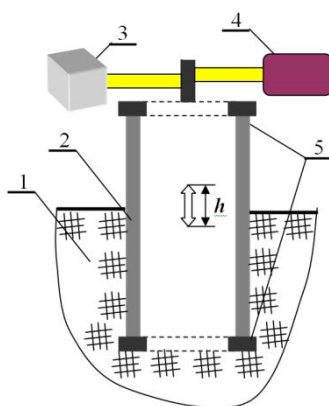
$$P = \frac{A}{r}, \quad (5)$$

где коэффициент пропорциональности  $A$  определяется из начальных значений величины давления  $P_0$  и радиуса  $r_0$  цилиндрической ударной волны, сформировавшейся в момент удара, а именно:

$$A = P_0 r_0. \quad (6)$$

На основании (5) и (6) радиус, на котором давление ударной волны достигнет критического, будет определять глубину полного разрушения скальной породы, т.е.:

$$r = r_0 \frac{P_0}{P_{кр.}} = 0,01 \frac{6,58 \cdot 10^6}{1,75 \cdot 10^6} = 0,376 \text{ м.} \quad (7)$$



**Рисунок 2 – Принципиальная схема пенетрации сваи в грунт:**  
 1 – грунт; 2 – железобетонная свая-оболочка; 3 – груз дебаланса;  
 4 – электродвигатель; 5 – прокладки

Получается, что для скальной породы вполне достаточно обеспечить мощность электровибратора ~ 100 кВт для свай-оболочек длиной 12 м.

Объем кластера  $Al_2O_3$  составляет  $(2 \cdot r_{кл})^2 \cdot L_{кл}$  ( $r_{кл}$  – эффективный радиус кластера и  $L_{кл}$  – длина кластера). Тогда общая концентрация кластеров  $Al_2O_3$ , которые будут полностью разрушены, составит:

$$N = \frac{\pi r_{сп}^2}{2} \pi d \frac{1}{(2r_{кл.})^2 L_{кл.}}, \quad (8)$$

где  $r_{сп}$  – радиус полного разрушения скальной породы.

Разного рода глины представляют собой каолин, который насыщен водой. Химическая формула имеет вид:  $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$ . В глинах каолин обладает нитевидной структурой. Между нитями каолина присутствует вода. Разрушение глиняных слоев в конечном итоге обусловлено разрывом бинарных связей между кластерами глинозема. Количество каолина в глинах в единице объема разное и определяется как наличием различных примесей, так и количеством воды, содержащейся в глине. Тогда на основании формулы (8) применительно к глине радиус полного ее разрушения следует представить в виде:

$$r_{гл.} = r_{сп} \frac{N}{\Delta N}. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta N/N$  – доля кластеров глинозема в глине.

Исходя из химического состава глины количество кластеров глинозема в единице объема в два раза меньше, чем при полном заполнении пустот в решеточной структуре кремнезема. Поэтому на основании (9) радиус полного разрушения будет 0,0752 м. Чтобы пенетрация в глиняных слоях происходила оптимальным образом необходимо потребляемую мощность электровибратора уменьшить почти в 2 раза.

Если проходка ствола происходит по песчаному грунту, то гидростатическим давлением водяного столба песка можно пренебречь, а в процессе деформации песчаного состава происходит быстрое заполнение молекулами воды освободившегося межкластерного пространства. Связь между кластерами  $Al_2O_3$  будет происходить уже через молекулу воды. Энергия связи ослабевает. В горизонтальном направлении она составит 0,032 эВ, а в вертикальном направлении – 0,047 эВ. Тогда, пренебрегая размерами молекулы воды, количество кластеров глинозема, связь между которыми будет разрушена, существенно увеличится. Радиус полного разрушения песчаного слоя при единичном ударе составит:

$$r_{пс.} = r_{сп.} \frac{E_{св. Al_2O_3}}{E_{св. H_2O}} = 0,0376 \frac{0,263}{0,047} = 0,210 \text{ м}. \quad (10)$$

При проходке по песчаному грунту при амплитуде подъема-опускания сваи 2 см мощность электровибратора может быть уменьшена.

Полученные теоретические оценки проходки стержня в различных грунтах в пределах ошибок при выборе исходных данных и выполняемого расчета достаточно хорошо подтверждаются экспериментальными результатами.

При распространении ударной волны меньше критического значения происходит растрескивание законтурного массива.

Разработанная физическая модель кластерного строения различных земных пород позволила определить объемы полного их разрушения в процессе единичного удара стержня о грунт. При этом учитывалось полное превращение энергии удара в объеме полного разрушения породы. Другие механизмы разрушения оставались вне поля зрения. В частности, не учитывалось растрескивание различных пород в законтурном массиве, а также явление интерференции упругих и пластических волн сжатия.

### РАСТРЕСКИВАНИЕ ЗАКОНТУРНОГО МАССИВА

Среда, в которой выполняется закон Гука, является упругой. В такой среде скорость распространения волн определяется по формуле, которая была установлена Ньютоном:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (11)$$

где  $E$  – модуль Юнга (модуль упругого сжатия) и  $\rho$  – плотность среды.

Модуль Юнга находят из потенциала взаимодействия молекулярных кластеров внутри горной породы, тогда [1]:

$$E = \frac{2\Delta U}{21,21r_0^3 e^2}. \quad (12)$$

Здесь  $\Delta U$  – разность потенциальной энергии связи при сжатии на относительную величину  $e$ ;  $r_0$  – расстояние между кластерами.

На основании (10) и (11) для скорости волны сжатия получаем:

$$v = \frac{1}{e} \sqrt{\frac{2\Delta U}{21,21R_0^3 \rho}}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что чем больше сжатие, тем меньше скорость распространения фронта волны сжатия.

В горных породах под действием вибрации пластическая деформация превращает твердое тело в жидкое состояние. Это происходит при потенциале взаимодействия между кластерами равным нулю или больше нуля. В этом случае возникает жидкая прослойка, которая формируется в виде гранецентрированной структуры. Снятие напряжения приводит к образованию трещины, которая заполнена отдельными молекулами. По существу образуется дислокация, и твердое тело еще не распадается.

Скорость распространения волн сжатия в этом случае уменьшается вследствие увеличения относительного сжатия и уменьшения разности энергий связи для соответствующего относительного сжатия.

Когда мощность, потребляемая электровибратором, не обеспечивает удар выше критического значения, т.е. стержень в процессе пенетрации опирается в твердую породу, то в этом случае вся работа, совершаемая электровибратором, расходуется на разрушение стержня.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕРЖНЕ ПРИ УДАРЕ

Физическая модель разрушения стержня приведена на рисунке 3 [2].

Дифференциальные уравнения движения стержня имеют вид [2]:

- на верхнем участке свободном от сил трения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{g}{a^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq r. \quad (14)$$

- на нижнем участке, с учетом сил вязкого трения  $v$ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{g}{a^2} - \frac{v}{a^2} \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad r \leq x \leq l. \quad (15)$$

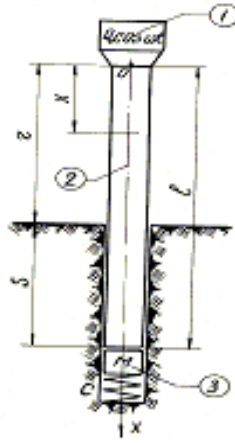


Рисунок 3 – Модель упругого стержня с частично приложенной силой вязкого трения  $\nu$  по длине стержня

Граничные условия будут:

- на верхнем конце стержня:

$$EF \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = - (P_0 + Q_0 \cos \omega t) \Big|_{x=0} + \frac{P_0}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=0}. \quad (16)$$

- на нижнем конце стержня:

$$EF \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} = -M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=l} - cu \Big|_{x=l}. \quad (17)$$

Условия сопряжения:

$$u \Big|_{x=r-0} = u \Big|_{x=r+0}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=r-0} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=r+0}. \quad (19)$$

При этом максимальные напряжения при установившихся колебаниях достигаются в точках  $0 \leq x \leq r$ :

$$x = r \pm \frac{a}{\omega} (\gamma - n\pi) < r. \quad (20)$$

Из формулы (20) видно, что расположение максимальных напряжений зависит от частоты возмущающей силы  $\omega$  и  $\gamma$ .

Частотное уравнение резонансных колебаний на нижнем участке может быть записано при  $\nu \rightarrow 0$  в виде:

$$tg \left( \frac{\omega l}{a} + \frac{EF \omega}{a(c - M \omega^2)} \right) = \frac{EF g}{P_0 a \omega}, \quad (21)$$

которое решается графически (рисунок 5).

При отрыве нижнего конца стержня от массы на пружине и последующих ударов в системе возникают виброударные режимы и полученные выражения верны только до наступления отрыва.

Результаты вычислений по данной модели показывают, что при значительном боковом трении до наступления отрыва растягивающие напряжения в стержне могут достигать значительных величин и вызвать появление горизонтальных трещин, что имеет место на практике.

Были изучены виброударные режимы колебаний и волновые процессы в стержне.

Исследованы возникающие виброударные режимы, определена их устойчивость и далее найдено распространение продольных волн напряжений при ударе стержня о массу на пружине.

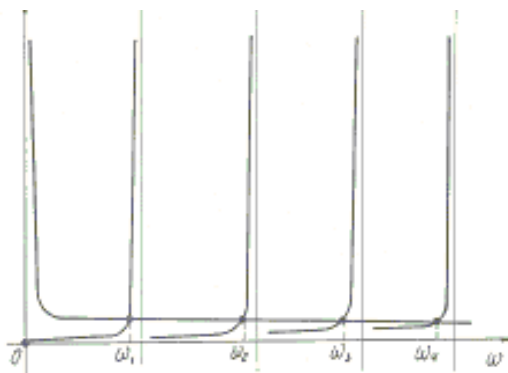


Рисунок 5 – Графическое решение частотного уравнения (21)

В формулах, выражающих напряжения, входит модуль Юнга  $E$ , величина которого совпадает с точностью до 30% с определенным ранее формулой (12) для  $E$  кластеров, что указывает на общность принятых моделей на нано- и макроуровнях.

В результате численных расчетов было показано, что в среднем сечении стержня при отражении первой ударной волны от вибратора при  $at=3/2 l$  и при значениях параметров стержня, соответствующих эксперименту, в зависимости от жесткости пружины при  $c \geq 500$  МПа/м сжимающие напряжения достигают порядка 25-30 МПа и могут быть причиной появления продольных трещин в композиционном материале (бетоне).

При  $c \leq 100$  МПа/м в стержне появляются растягивающие напряжения, которые вызывают образование поперечных трещин по периметру стержня.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречихин, Л.И. Наночастицы и нанотехнологии [Текст] / Л.И. Гречихин. – Мн.: ИООО «Право и экономика», 2008. – 406 с.
2. Подлозный, Э.Д. О распространении продольных волн вдоль стержня при пенетрации его в упругую среду [Текст] / Э.Д. Подлозный // Республ. сб. научн. тр. – Минск: Машиностроение. – 2001. – Вып. 17. – ч. 1. – С. 347-351, ч. 2. – С. 351-356.

### Гречихин Леонид Иванович

Минский государственный авиационный колледж, Беларусь, г. Минск  
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Естественно-научных дисциплин»  
Тел.: +7 10 375 29 355 19 29  
E-mail: gretchihin@yandex.ru

### Подлозный Эдуард Дмитриевич

Частное учреждение образования «БИП – Институт правоведения», Беларусь, г. Минск  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Экономико-математических и информационных дисциплин»  
Тел.: +7 10 375 29 142 21 92  
E-mail: ilon@mail.by

HRECHIKHIN L.I., PODLOZNY E.D.

## NANOLEVEL OF CONSIDERATION OF THE PHENOMENON OF A PENETRATION OF CORES IN THE CONTINUOUS ENVIRONMENT

*Physical-mathematical model has been developed from interaction lead rod with particles in surround environment in process his penetration on atom-molecular level and on nanolevel crossing and then on macrolevel crossing. It is definition of a value energy of bond between particles of material continuous medium, in which rod is motion. It is of value of force, witch is following to*



*rod, that the rod is not destruction and driving in continuous medium witch maximum velocity. Optimal porosity is find by experimental of sending force on driving rod and it is give the most effective realized penetrating.*

**Keywords:** *rod, particle, penetrating, nanocluster, value energy.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Grechihin, L.I. Nanochasticity i nanotehnologii [Tekst] / L.I. Grechihin. – Minsk: IOOO «Pravo i ekonomika», 2008. – 406 s.
2. Podloznyj, E.D. O rasprostraneni prodl'nyh voln vdol' sterzhnja pri penetracii ego v upruguju sredu [Tekst] / E.D. Podloznyj // Respubl. sb. nauchn. tr. – Minsk: Mashinostroenie. – 2001. – Vyp. 17. – ch. 1. – S. 347-351, ch. 2. – S. 351-356.

### **Hrechikhin Leonid Ivanovich**

Minsk state aviation college, Belarus, Minsk

Doctor of physical and mathematical sciences, professor of department «Is natural-scientific disciplines»

Ph.: +7 10 375 29 355 19 29

E-mail: gretchihin@yandex.ru

### **Podlozny Edward Dmitrievich**

Private establishment of formation «PIP – jurisprudence Institute», Belarus, Minsk

Candidate of technical science, senior research assistant, associate professor of department «Economic-mathematical and information disciplines»

Ph.: +7 10 375 29 142 21 92

E-mail: ilon@mail.by

ГРИДНЕВ С.Ю.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ НАПЛАВНОГО МОСТА

*Разработана новая методика динамических испытаний наплавного моста неразрезной системы. Изучены характерные особенности колебаний наплавных мостов при движении по нему одиночных транспортных средств во время проведения натурных измерений. Приведены в операторной форме уравнения совместных колебаний моста и автомобиля, алгоритм расчета. Выполнен теоретический анализ путем сравнения результатов вычислительных экспериментов по моделированию колебаний с использованием уточненной расчетной схемы и натурных измерений.*

**Ключевые слова:** *наплавной мост, натурные измерения, оптический измеритель, динамические перемещения, уточненная расчетная схема, алгоритм расчета колебаний, вычислительный эксперимент.*

### Введение

Определение динамических перемещений является необходимой частью испытания и обследования любого транспортного сооружения. Исследуя их в масштабе реального времени, можно на основе детального анализа получить информацию о состоянии несущей конструкции, что вместе с данными статическими испытаний позволит более точно прогнозировать надежность последней. Большой объем экспериментальных исследований позволяет получать реальную картину напряженно-деформированного состояния пролетных строений автодорожных мостов. В ряде случаев натурные измерения проверяют достоверность результатов вычислительных экспериментов по моделированию колебаний мостов от воздействия проезда транспортных средств, определяют повышенные значения перемещений и внутренних усилий, дают возможность выявить свойства сооружения, пренебрежение которыми приводят к искажению истинных результатов. Расхождение результатов натурных измерений с результатами вычислительных экспериментов показывают необходимость разрабатывать уточненные динамические расчетные схемы, адекватно описывающие поведение транспортных сооружений.

Наглядно иллюстрирует это графики прогибов середины наплавного моста длиной 89,0 м при движении по нему одиночного автомобиля массой около 22 т со скоростью около 40 км/час, полученные расчетом с использованием обычно применяемой расчетной схемы и при проведении эксперимента (рисунок 1). На первом графике (пунктирная линия) представлены результаты расчета с использованием в качестве расчетной схемы балки на сплошном упругом основании, а динамическое воздействие автомобиля моделирует движущаяся по мосту система сосредоточенных сил, равнодействующая которых равна полному собственному весу автомобиля. На втором графике (сплошная линия) представлены результаты натурных измерений с использованием оптического измерителя перемещений автодорожных мостов для дистанционной регистрации колебаний.

Необходимость проведения экспериментальных исследований вызвана недостаточностью информации об особенностях поведения наплавных мостов при движении по ним одиночных транспортных средств.

В процессе исследования проведена апробация и изучение возможностей оптического измерителя перемещений для регистрации колебаний наплавного моста при движении по нему транспортных средств, выполнено тестирование результатов вычислительных экспериментов, произведена оценка резервов несущей способности существующих пролетных строений в связи с происходящим в настоящее время переходом на новые расчетные нагрузки А14 и НК100. Особенностью наплавных мостов являются значительные вертикальные перемещения. Отличительной особенностью оптического измерителя по сравнению с другими измерительными системами является возможность одновременного определения перемещений в большом диапазоне от 3 мкм до 1 м.

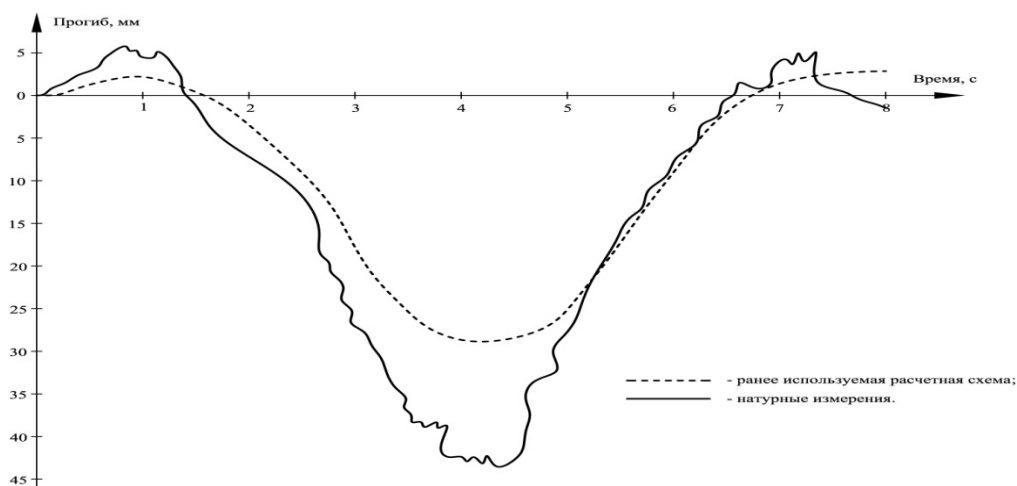


Рисунок 1 – Графики прогибов середины пролетного строения наплавного моста

**Описание исследуемого объекта.** Объектом исследования является наплавной мост неразрезной системы через р. Дон на км 17+300 автодороги Воронеж-Малышево-Гремячье длиной 89,0 м, который реконструирован в 2007 году под современные нагрузки А-11, НК-80 с габаритами Г6.9+2×0,5. Проект реконструкции моста выполнен ООО «Мостинжсервис» г. Воронеж. Реконструкция произведена ЗАО «Липецкавтомост». Пролетное строение, выполненное по индивидуальному проекту, состоит из четырех стальных сплошностенчатых главных балок и продольной вспомогательной балки из прокатного профиля. Поверху главные балки объединены сборными железобетонными плитами, которые прикреплены к ним на металлических упорах. Кроме того, главные металлические балки объединены вертикальными и горизонтальными решетчатыми связями. Общий вид наплавного моста с низовой стороны по течению р. Дон показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Общий вид моста с левой стороны

#### Дистанционная регистрация динамических перемещений от подвижной нагрузки

Регистрация перемещений наплавного моста осуществлялась оптическим измерителем перемещений [1]. Основу измерений составляет оптический метод определения пространственных координат с использованием фотометрической установки, разработанной В.В. Волковым для определения прогиба жестких конструкций. Так как измерения проводятся на расстоянии, при котором влияние объекта на измерительный прибор минимально, то появляется возможность определения величины прогиба для тех элементов, которые недоступны для традиционных методик определения их перемещений. Это, в первую очередь, элементы опор мостов, плавучие и понтонные мосты, длинные пролеты над водой и т.д. Определение их динамических характеристик является еще более трудной задачей.

Проведение эксперимента базируется на методике определения динамического перемещения точки конструкции с прикрепленной яркостной отметкой. В качестве отметки вы-

бран диффузионный отражатель калиброванных размеров (это желательно, но не необходимо, можно выбрать элемент конструкции с контрастными зонами).

Оптическая система фотометрической установки представляет собой 11 линзовую диоптриальную систему с совмещенными фокусами и эквивалентным от 6 до 40 кратным изменяемым оптическим увеличением фирмы Canon. В качестве фотоприемного узла использована модифицированная камера этой фирмы для работы с полноформатными изображениями, формируемыми в процессе измерения. Для этого были изменены размеры фоточувствительного сенсора. Для используемого оборудования они составили  $4000 \times 3000$  точек разложения. Максимальная величина пикселя на фотометрической матрице имеет порядок 7,5 мкм. Учитывая дифракционный предел оптики, используемой в измерительной установке, можно производить замеры перемещений яркостных точек на величину порядка 0,01 мм, что соответствует размаху перемещения  $4 \times 3$  см. Вычисление координат точек осуществляется триангуляционным преобразованием, в размере эквивалентного треугольника: конуса съемки рабочей поверхности изображения и сечения плоскости исследуемого объекта; для этого используется преобразование равноотстоящих точек в пространстве и корреляция яркостных образов этих точек.

Весь временной интервал нагружения элементов наплавного моста фиксируется как изменение положения оптического образа эталона. Для упрощения преобразования и последующей интерпретации данных, полученных в эксперименте, данные сохраняются в виде, похожем на видеосъемку, что позволяет выявить в процессе камеральной обработки ошибки и погрешности измерений. Так как вся необходимая информация содержится в получаемом фотометрическом измерении, то рассмотрим начальную стадию обработки.

Основным эталонным фотометрическим изображением являются первые кадры-сечения, по которым в последующем вычисляются частные корреляции и, с учетом вводимых коэффициентов, перемещения элементов конструкции.

### **Программа натурных измерений и их методика**

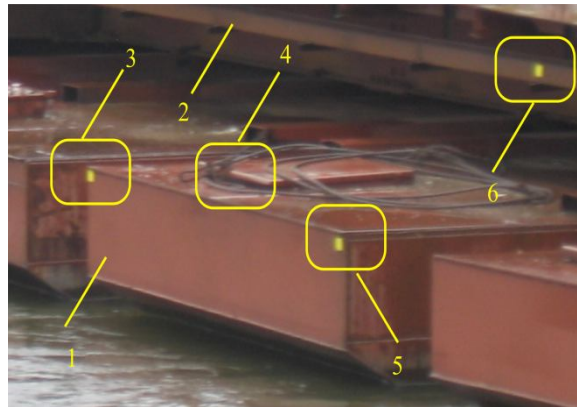
Для оценки НДС моста в качестве изучаемого параметра приняты вертикальные и горизонтальные вдоль оси моста перемещения точек средней плавучей опоры, прогибы середины низа левого прогона пролетного строения, а также вертикальные перемещения плавучей опоры в начале моста, так как в этом сечении при въезде транспортного средства возникают, как правило, наибольшие перемещения.

На рисунке 3 показан центральный понтон 1 речной части исследуемого моста, на который опирается балка 2. Для исследования смещения понтона выбраны участки 3-6. Точки 3 и 5 соответствуют углам понтона, а точка 4 центру. Так как важно и давление, передаваемое от балки, то производилось измерение перемещения балки в точке 6. Общий вид части пролетного строения, опирающегося на плавучие опоры, приведен на рисунке 5.

Определение абсолютной величины прогиба производится введением масштабирующего коэффициента, получаемого делением известного размера на эталонном изображении на количество точек в нем по горизонтали и вертикали. На рисунках 3, 4 показан понтон с установленными калиброванными метками размером  $5 \times 5$  сантиметров. Расстояние до правой метки на понтоне составило 32,5 метра, угол между нормалью моста и центром понтона составил  $39^{\circ}46'$ , в горизонте угол составил  $1^{\circ}65'$ , оптическое увеличение – 40 раз.

Регистрация прогиба осуществляется оптическим измерителем, определяющим координаты точек поверхности покрытия, и на основе преобразования Фурье с помощью оптической системы, проецирующей изображение массива точек на поверхность оптического преобразователя с последующим представлением в цифровой вид. Это позволяет определить прогиб или сдвиг исследуемых точек наплавного моста. Основным преобразующим элементом является матрица CCD сенсора, который с частотой до 200 Гц преобразовывает яркостные распределения в интенсивность электрического сигнала, временное соотношение которого соответствует расположению всех яркостных точек поверхности объекта. Для обеспечения подсветки и необходимой яркости при измерении используется лазер, подсвечивающий поверхность ис-

следуемого объекта. Это также позволяет производить измерения при различной освещенности. Одновременно производится регистрация вида транспортного средства на устройство записи с последующим преобразованием изображения в цифровой вид. Оптическая система со стабилизатором вибраций позволяет избежать погрешности в процессе измерения (рисунок 5). В состав комплекта измерения входят аккумуляторный блок, позволяющий проводить измерения в течение 8-10 часов, боксовая система защиты от механических и климатических воздействий, соединителей, обеспечивающих обмен информацией между измерительным блоком и ПЭВМ, штатив, позволяющий позиционировать измерительную систему относительно плоскости измерения. Наведение на объект обеспечивается целеуказанием лазерным источником в виде луча оптического излучения мощностью 15-20 мВт с механизмом юстировки. После проведения юстировки в отсутствии транспортного потока производится съемка в течение необходимого времени, специальная программа на основе фильтрации шумовых составляющих и корреляционного вычисления производит обработку потока данных.



*Рисунок 3 – Центральный понтон исследуемого моста с указанием точек, в которых определяются перемещения: 1 – плавучая опора моста; 2 – балка пролетного строения моста; 3 – левый угол понтона; 4 – центр понтона; 5 – правый угол понтона; 6 – исследуемая точка балки над центром понтона*



*Рисунок 4 – Вид моста с установленными калиброванными эталонными метками*



*Рисунок 5 – Съемка колебаний моста оптическим измерителем*

### Математическое описание вычислительного эксперимента

Уточненная пространственная расчетная схема наплавного моста и математическое описание его колебаний подробно изложены в [2]. Учет геометрической нелинейности в работе отдельных плавучих опор выполнено в [3]. Здесь приведем основные уравнения в операторном виде. Исходные уравнения, описывающие пространственные колебания пролетного строения наплавного моста неразрезной системы, принимаются на основе теории колебаний тонкостенных упругих стержней В.З. Власова. Пролетное строение наплавного моста

неразрезной системы имеет одну вертикальную ось симметрии. Поэтому в математическом модели изгибные колебания в вертикальной плоскости пролетного строения  $y(x, t)$  описываются самостоятельным дифференциальным уравнением в частных производных пятого порядка, содержащим в общем случае смешанные производные.

В операторном форме это уравнение имеет вид:

$$L_1[\ddot{y}(x, t), y^V(x, t), y^{IV}(x, t)] = F_1(\vec{R}, C_j, \vec{P}, \vec{S}_m) \quad (1)$$

где  $L_1$  – линейный дифференциальный оператор;  $F_1$  – нелинейный оператор нагрузки;  $\vec{R} = [\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_j, \dots, \vec{R}_{q(t)}]^T$  – вектор давлений осей  $q(t)$  автомобилей, одновременно находящихся на пролетном строение в данный момент времени;  $\vec{S}_m = [S_1, S_2, \dots, S_{N_p}]^T$  – вектор усилий в вертикальных упругих связях, моделирующих подкладки;  $\vec{P} = [P_1(t), P_2(t)]^T$  – вектор давлений, передаваемых на пролетное строение от левой и правой переходных частей;  $C_j$  – матрица, определяющая положение осей  $j$ -ого автомобиля на участках мостового перехода (левый подход, левая переходная часть, речная часть, правая переходная часть, правый подход).

Совместная система двух дифференциальных уравнений в частных производных пятого порядка, описывает крутильные  $\gamma(x, t)$  и связанные с ними изгибные колебания в горизонтальной плоскости  $z(x, t)$ . Она в операторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} L_2[\ddot{z}(x, t), \gamma^{IV}(x, t), \gamma''(x, t), \dot{\gamma}(x, t), \dot{\gamma}''(x, t)] = F_2(\vec{R}_j \cdot \beta_{a_j}, \vec{S}_{m_i} \cdot \beta_{\Pi}, \vec{M}) \\ L_3[\dot{\gamma}(x, t), z^{IV}(x, t), z''(x, t), \ddot{z}(x, t), \ddot{z}''(x, t)] = F_3(\vec{H}_m) \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_2, L_3$  – линейные дифференциальные операторы;  $F_2, F_3$  – нелинейный и линейный операторы нагрузки;  $\vec{M} = [M1_{nc}(\gamma(0, t), M2_{nc}(\gamma(\ell_\sigma, t))]^T$  – вектор реактивных моментов по концам пролетного строения, действующих со стороны скручиваемых переходных частей;  $\vec{H}_m$  – вектор усилий в горизонтальных упругих связях, моделирующих подкладки.

Система трех обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывает движения пролетного строения как твердого тела, положение которого определяется вектором  $\vec{Z}_T$ :

$$L_\sigma(\ddot{\vec{Z}}_T, \dot{\vec{Z}}_T, \vec{Z}_T) = F_\sigma(\vec{R}, C_j, \vec{P}, \vec{S}_m) \quad (3)$$

где  $L_\sigma$  – линейный дифференциальный оператор;  $F_\sigma$  – нелинейный оператор нагрузки;  $\vec{Z}_T = [z_\sigma(t), \varphi_\sigma(t), \alpha_\sigma(t)]^T$  – вектор обобщенных координат, определяющих положение пролетного строения как твердого тела.

Таким образом, полный вектор обобщенных координат, определяющих положение произвольной точки пролетного строения, имеет вид:

$$\vec{Z} = [y(x, t), \gamma(x, t), z(x, t), z_\sigma(t), \varphi_\sigma(t), \alpha_\sigma(t)]^T.$$

Колебания каждой плавучей опоры, имеющей две оси симметрии, под действием переменных во времени усилий, передающихся через подкладки от пролетного строения, сил демпфирования, поддержания и восстанавливающих моментов, описывается для продольной качки системой обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка и включает уравнения вертикальной  $z_{n_i}$ , килевой  $\alpha_{n_i}$  и продольно-горизонтальной  $\xi_i$  составляющей и одним уравнением бортовых колебаний из системы уравнений поперечной качки. В уравнениях учитываются восстанавливающие силы, массы и моменты инерции присоединенной воды, демпфирование волновой и вязкостной природы, буксировочное сопротивление при продольно-горизонтальных колебаниях.

Система трех обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка продольной качки и одно обыкновенное дифференциальное уравнение бортовой качки  $j$ -ой опоры в операторной форме имеют вид:

$$L_j^{\Pi}(\ddot{\vec{Z}}_j^{\Pi}, \dot{\vec{Z}}_j^{\Pi}, \vec{Z}_j^{\Pi}) = G_j(\vec{S}_j, \vec{H}_j^R) \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

где  $L_j^{\Pi}$  – линейный дифференциальный оператор  $j$ -ой опоры;  $G_j$  – нелинейный оператор нагрузки на  $j$ -ую опору;  $N$  – число плавучих опор, на которые опирается пролетное строение моста;  $\vec{S}_j = [S_{2i-1}^l(t), S_{2i}^l(t), S_{2i-1}^{np}(t), S_{2i}^{np}(t), H_{2i-1}^l(t), H_{2i}^l(t), H_{2i-1}^{np}(t), H_{2i}^{np}(t)]^T$  – полный вектор усилий в вертикальных и горизонтальных упругих связях  $j$ -ой плавучей опоры;  $\vec{H}_j^R$  – нелинейный вектор восстанавливающих сил (выталкивающих сил и реактивных восстанавливающих моментов), действующих на плавучую опору, со стороны жидкости;  $\vec{Z}_j^{\Pi} = [z_{n_j}(t), \xi_{n_j}(t), \alpha_{n_j}(t), \varphi_{n_j}(t)]^T$  – вектор обобщенных координат, определяющих положение  $j$ -ой плавучей опоры.

Объединение уравнений происходит через усилия в упругих связях, моделирующих подкладки. Силы взаимодействия пролетного строения и плавучих опор определяются через деформации упругих связей  $\vec{\Delta}_m$  как разности перемещения пролетного строения в точке прикрепления упругой связи и перемещения понтона в направлении этой связи.

#### Алгоритм расчета

Методика расчета совместных колебаний наплавного моста неразрезной системы с движущимся по нему транспортным средством принята следующей. Решение уравнений, описывающих деформации пролетного строения, основано на использование явных разностных схем. Для решения уравнений движения пролетного строения как твердого тела применен метод Эйлера, а для решения нелинейных уравнений пространственных колебаний отдельных плавучих опор – метод Розенброка 2-го порядка или метод упругих решений.

#### Анализ натурных измерений и результатов вычислительных экспериментов

По мосту пропускался трехосный автомобиль КАМАЗ массой около 22 т с различными постоянными скоростями: от сверхмалой – около 5 км/час для моделирования статического нагружения и до 40 км/час. Для каждого заезда при обработке результатов измерений в масштабе реального времени выполнялось построение графиков вертикальных и горизонтальных вдоль оси моста перемещений точек средней плавучей опоры, прогибов середины низа левого прогона пролетного строения, а также вертикальных перемещений плавучей опоры в начале моста в зависимости от положения автомобиля. Ниже приведем только совмещенные графики изменения прогиба середины низа левого прогона пролетного строения, полученные по результатам натурных измерений и расчета по уточненной расчетной схеме. Они показывают удовлетворительное совпадение результатов натурных измерений и расчетов по уточненной расчетной схеме, что говорит о достоверности результатов, полученных при проведении вычислительных экспериментов.

Проведенный анализ результатов вычислительных экспериментов и натурных измерений, сравнение отдельных результатов вычислительных экспериментов с результатами натурных измерений позволили сделать следующие выводы:

- 1) величины вертикальных перемещений пролетного строения в начале пролетного строения и его середине, полученные в результате вычислительных экспериментов с достаточной степенью точности совпадают с результатами натурных измерений;
- 2) использование в качестве расчетной схемы балки на упругом основании приводит к заниженным значениям прогибов пролетного строения в ряде случаев (в большей степени при скоростях движения выше 30 км/час) до 8-16%;



3) расчеты наплавных мостов неразрезной системы показали возможность значительного увеличения скорости движения по ним до 70 км/час для одиночных автомобилей массой до 25 т при отсутствии переломов профиля проезжей части в местах сопряжения переходных и речной частей и удовлетворительном состоянии проезжей части. Это позволит увеличить пропускную способность наплавных мостов путем повышения скоростей движения транспортных средств в 4-5 раз и увеличить их грузоподъемность;

4) при движении по мостам с одной полосой движения увеличение пропускной способности возможно за счет увеличения массы одиночного автомобиля на 15-20% с сохранением плавучести моста и увеличением скорости движения до 40 км/час;

5) вклад бортовой и килевой качки в величины вертикальных перемещений пролетного строения может достигать 8-12% в зависимости от скорости движения транспортного средства;

6) амплитуды изгибных колебаний в горизонтальной плоскости невелики, однако установлено, что учет связанности крутильных и изгибных колебаний уменьшает вертикальные перемещения пролетного строения за счет вовлечения плавучих опор в процесс горизонтальной качки и уменьшает амплитуды килевой качки отдельных плавучих опор;

7) при движении одиночных автомобилей со смещением с продольной оси при значительном кинематическом возмущении на существующих мостах возможны ситуации потери устойчивости отдельных плавучих опор;

8) в уравнениях пространственных колебаний наплавных мостов в отличие от других строительных конструкций, моделируемых тонкостенным стержнем, необходимо учитывать слагаемые, соответствующие компонентам инерционных поперечных нагрузок от поворотов сечения относительно главных осей, так как пролетное строение вовлекает в движение плавучие опоры, обладающие значительной собственной инерцией.

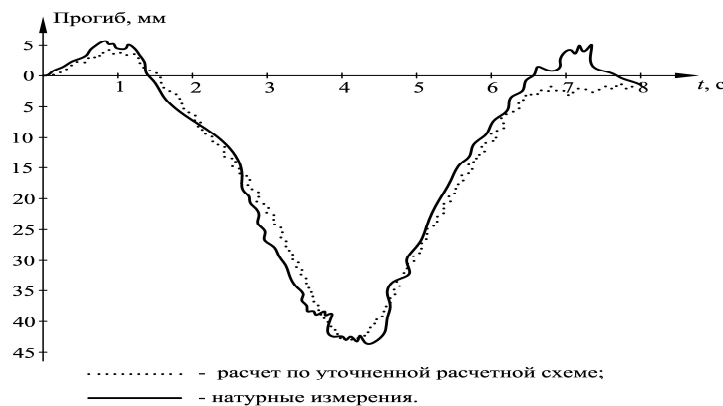


Рисунок 6 – Графики прогибов середины пролетного строения наплавного моста

### Выводы

Разработанная методика натуральных измерений может эффективно применяться в дальнейшем для изучения пространственных колебаний разнообразных наплавных автодорожных мостов при воздействии динамических нагрузок. Она является более простой и универсальной чем подход, описанный в [4], и не требует специальной подготовки. Показана необходимость использования уточненной пространственной расчетной схемы при моделировании колебаний наплавных мостов неразрезной системы. Теоретический анализ путем сравнения результатов вычислительных экспериментов и натуральных измерений показал, что они являются достоверными и отражают качественный характер колебательного процесса. Обоснована возможность увеличения пропускной способности наплавных мостов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриднев, С.Ю. Натурные измерения колебаний упруго опертого сталежелезобетонного моста при движении по нему автомобиля в режиме торможения [Текст] / С.Ю. Гриднев, В.В. Волков, А.Н. Будковой // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. №1. – С. 112-120.

2. Гриднев, С.Ю. Уточненная пространственная расчетная схема наплавного моста неразрезной системы [Текст] / С.Ю. Гриднев // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2008. – Вып. №1. – С. 83-92.
3. Гриднев, С.Ю. Учет нелинейного поведения плавучих опор в уточненной пространственной расчетной схеме наплавного моста неразрезной системы [Текст] / С.Ю. Гриднев // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – Вып. № 1. – С. 83-92.
4. Chen X., Lin Z., Wu G., Fu S. Testing method and data analysis of moving-load-induced dynamic displacements of floating bridges / Zhendong Ceshi Yu Zhenduan // Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 26(2), 2006. – pp. 97-101.

**Гриднев Сергей Юрьевич**

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика»

Тел.: +7 (4732)71-52-30; +7-910-346-60-19

E-mail: gridnev\_s\_y@rambler.ru

---

GRIDNEV S.Yu.

## THE THEORETICAL ANALYSIS OF NATURAL MEASUREMENTS OF FLUCTUATIONS OF THE FLOATING BRIDGE

*The new technique of dynamic tests the floating bridge of not cutting system is developed. Prominent features of fluctuations of floating bridges are studied at movement on it of single vehicles during carrying out of natural measurements. Are resulted in the operational form of the equation of joint fluctuations of the bridge and the car, algorithm of calculation. The theoretical analysis by comparison of results of computing experiments on modeling of fluctuations with use of the specified settlement scheme and natural measurements is made.*

**Keywords:** *The floating bridge, natural measurements, optical measuring instrument, the dynamic movings, the specified settlement scheme, algorithm of calculation of fluctuations, computing experimen.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Gridnev, S.Yu. Naturnye izmereniya kolebanij uprugo opertogo stalezhelezobetonnoogo mosta pri dvizhenii po nemu avtomobilja v rezhime tormozhenija [Текст] / S.Yu. Gridnev, V.V. Volkov, A.N. Budkovej // Nauchnyj vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2010. – Vyp. №1. – S. 112-120.
2. Gridnev, S.Yu. Utochnennaja prostranstvennaja raschetnaja shema naplavnoogo mosta nerazreznoj sistemy [Текст] / S.Yu. Gridnev // Nauchnyj vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2008. – Vyp. №1. – S. 83-92.
3. Gridnev, S.Yu. Uchet nelinejnogo povedeniya plavuchih opor v utocnnojj prostranstvennoj raschetnoj sheme naplavnoogo mosta nerazreznoj sistemy [Текст] / S.Yu. Gridnev // Nauchnyj vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2009. – Vyp. № 1. – S. 83-92.
4. Chen X., Lin Z., Wu G., Fu S. Testing method and data analysis of moving-load-induced dynamic displacements of floating bridges / Zhendong Ceshi Yu Zhenduan // Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 26(2), 2006. – pp. 97-101.

**Gridnev Sergey Yurevich**

Voronezh state university of architecture and civil engineering, Voronezh

Candidate of technical science, associate professor of department «Structural mechanics»

Ph.: +7 (4732) 71-52-30; +7 910 346 60 19

E-mail: gridnev\_s\_y@rambler.ru

КЛЮЕВА. Н.В., ДОРОФЕЕВ А.А.

### К ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ НАГРУЖЕННОГО И КОРРОДИРУЮЩЕГО БЕТОНА\*

*В работе приведен анализ параметра глубины повреждений нагруженного и корродирующего бетонного элемента, влияющего на его длительную прочность. При этом, рассматриваются различные уровни напряженно – деформированного состояния элемента до и после образования трещин. Для принятой схемы коррозионных повреждений записана функция повреждений, которая позволяет рассчитывать остаточный ресурс силового сопротивления повреждаемых коррозией бетонных и железобетонных конструкций. Предложена методика экспериментального определения опытных значений параметров длительной прочности нагруженного и корродирующего бетона.*

**Ключевые слова:** коррозионное повреждение, силовое сопротивление, глубина повреждений, длительная прочность.

Значительная часть сооружений из бетонных и железобетонных конструкций работают в условиях совместного действия эксплуатационных нагрузок и агрессивных сред. Число публикаций, посвященных исследованию работы бетонных и железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред, достаточно велико. Однако подавляющее большинство исследований по оценке глубины коррозионных повреждений выполнено без учета напряженного состояния в корродирующих железобетонных элементах. В то же время реальные конструкции, эксплуатируемые в агрессивных средах, как правило, нагружены эксплуатационными нагрузками, т.е. подвержены совместному силовому и средовому нагружению. Поэтому исследование сопротивления элементов бетонных и железобетонных конструкций одновременному силовому и средовому воздействию представляет собой актуальную теоретическую задачу.

Математическая модель, отражающая кинетику неравновесных процессов продвижения коррозионных повреждений и изменение характеристик силового сопротивления поврежденного бетона, следуя В.М. Бондаренко [1], может быть представлена следующим выражением:

$$\frac{d[\Delta L(t, t_0)]}{dt} = -\alpha [\Delta L(t, t_0)]^m, \quad (1)$$

где  $\Delta L(t, t_0)$  – текущее значение параметра повреждений нагруженного железобетонного элемента с изменяющимися характеристиками силового сопротивления, определяемое из выражения:

$$\Delta L(t, t_0) = [L_{np} - L(t, t_0)] / L_{np}, \quad (2)$$

где  $t$  – текущее время;  $t_0$  – время начала наблюдений;  $\alpha$ ,  $m$  – эмпирические параметры кинетики исследуемых неравновесных процессов (параметры скорости, вида повреждений, как функции уровня и знака напряженного состояния).

Решение (1) имеет вид:

$$L(t, t_0) = f_M(\alpha, m, t) L_{np}, \text{ при } f_M < 1. \quad (3)$$

В качестве параметра  $L$  рассмотрим глубину повреждения элемента коррозией  $\delta(t, t_0)$ . Имеющиеся экспериментальные данные для количественной оценки параметров  $\alpha$  и  $m$  немногочисленны и разобщены.

Определим параметр  $\delta(t, t_0)$  в условиях изменяющегося уровня напряженно-деформированного состояния бетонного элемента при одновременном коррозионном воздействии на него. Известно, что время от начала приложения нагрузки до разрушения сжатого бетонного элемента зависит от степени коррозионной агрессии. Причем чем она выше, тем короче время до разрушения образца. В решаемой задаче при варьировании уровнем на-

\* Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект «Исследование энерго-, ресурсоэффективных конструктивных систем с высоким уровнем конструктивной безопасности и живучести»).

пряженного состояния бетонного элемента (рисунок 1) будем считать параметр агрессивности раствора неизменным. Экспериментальными исследованиями [2] установлено, что средовые повреждения по толщине бетонного элемента неоднородны и схематически могут быть представлены в виде трех областей (рисунок 1, а):

- область А, непосредственно примыкающая к поверхности контакта с агрессивной средой, которая подвергается полному разрушению бетона;
- область Б, примыкающая к области А и являющаяся переходной, для которой характерно последовательное уменьшение коррозионных повреждений вплоть до их полного исчезновения;
- область В, следующая по глубине, в которую агрессивная среда не проникла и которая сохранилась неповрежденной.

Частный случай этой схемы приведен на рисунке 1, б: область А здесь отсутствует, а область Б начинается не с полного, с частичного повреждения бетона  $R_{b^*}$ .

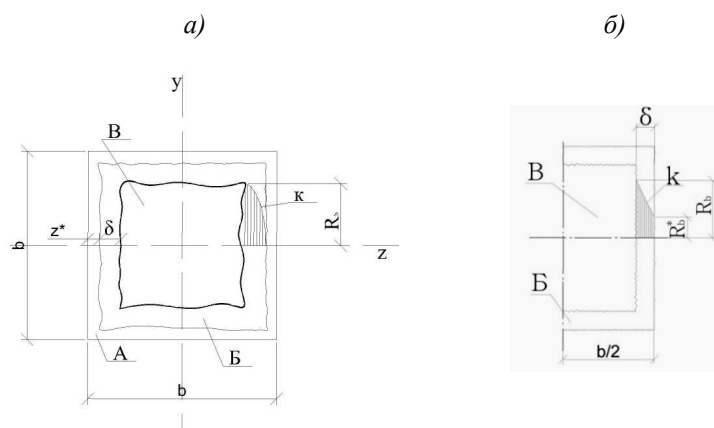


Рисунок 1 – Схема расчетной модели поперечного сечения поврежденного (а) и частично поврежденного (б) коррозией бетонного элемента

Запишем функцию повреждений бетона  $k$  в виде следующего полинома:

$$k = \sum_{i=0}^{i=2} a_i z^i, \quad \frac{dk}{dz} = \sum_{i=1}^{i=2} i a_i z^{i-1}. \quad (4)$$

Для принятой схемы коррозионных повреждений функция повреждений  $k$  позволяет рассчитывать остаточный ресурс силового сопротивления поврежденных коррозией бетонных и железобетонных конструкций. Ее достоинством является то, что параметры, найденные только из геометрических условий и зависящие лишь от глубины повреждений, единые для всех характеристик силового сопротивления поврежденного бетона: прочности, модуля мгновенной деформации, ползучести.

Коэффициенты полинома для схемы повреждений могут быть определены из начальных геометрических условий (рисунок 1, а):

$$\begin{aligned} &\text{при } z=b/2; k=0; \\ &\text{при } z=b/2-z^*; k=0; \\ &\text{при } z=b/2-z^*-\delta; k=1 \text{ и } \left. \frac{dk}{dz} \right|_{z=b/2-z^*-\delta} = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

значения коэффициентов полинома  $\alpha_i$ :  $\alpha_0=0$ ;

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{z^*+\delta - 1/b(2z^*+2\delta)^2}. \\ a_2 &= \frac{1}{(z^*+\delta)^2 - b/2(z^*-\delta)} \end{aligned} \quad (6)$$

Значения коэффициентов полинома для схемы повреждений (рисунок 1, б):

$$\text{при } z=b/2; k=R_b^*/R_b;$$

$$\text{при } z=b/2-\delta; k=1 \text{ и } \left. \frac{dk}{dz} \right|_{z=b/2-\delta} = 0; \quad (7)$$

получены аналогичным образом:

$$a_1 = \frac{1 - \frac{4}{b^2} \frac{R_b^*}{R_b} \left( \frac{b}{2} - \delta \right)^2}{\left( \frac{b}{2} - \frac{2\delta^2}{b} \right)} \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{1 + \frac{R_b^*}{R_b} \left( \frac{2\delta}{b} - 1 \right)}{(3/4 b^2 - 3/2 b \delta + \delta^2)}$$

Определив значения коэффициентов полинома используя зависимость (4), можно записать аналитическую зависимость для функции повреждений  $k$ . Полученная аналитическая зависимость для оценки предельной глубины повреждения нагруженного и корродирующего бетона удобна для расчета ресурса силового сопротивления эксплуатируемых в условиях агрессивных сред бетонных и железобетонных конструкций.

Особый интерес представляет задача оценки эволюционного накопления коррозионных повреждений в бетоне ведущего к внезапному выключению наиболее напряженного сечения и, как следствие – к внезапной структурной перестройке статически неопределимой конструктивной системы [3]. При этом возникает начало процесса локального разрушения конструктивной системы. Оценка возможности такого процесса может быть выполнена расчетом предельной глубины повреждения с помощью зависимостей (3) и (4).

Для оценки влияния уровня напряженного состояния элемента на предельную глубину коррозии при одновременном силовом и средовом нагружении бетонного образца введем следующие обозначения:

$\delta_{кр}^{*,0}$  – критическая глубина коррозии, которая приведет к разрушению бетонного образца при последующем приложении к нему заданного уровня нагрузки  $\zeta = \sigma/R_b$  при фиксированном времени действия средового воздействия  $t$ ;  $\delta_{кр}^{*,\sigma}$  – критическая глубина коррозии, которая приведет к разрушению образца при одновременном приложении к нему заданного уровня нагрузки  $\zeta$  и средового воздействия в течение фиксированного времени средового воздействия  $t$ .

Тогда влияние одновременно протекающих процессов силового и средового воздействия на бетон в координатах « $\delta_{кр}^{*,\sigma} - \zeta$ » может быть представлена графиком (рисунок 2) здесь координатой  $\delta_{кр}^{*,l}$ ,  $\zeta_l$  представлена точка начала микротрещинообразования в корродирующем бетоне (нижняя граница микротрещинообразования). Координатами  $\delta_{кр}^{*,T}$ ,  $\zeta_T$  представлена верхняя граница трещинообразования в бетоне.

Приведенный график отражает известные физические явления о том, что при уплотнении бетона в условиях отсутствия в нем трещин кинетика коррозионных процессов замедляется, а при более высоких уровнях нагрузки  $\zeta > \zeta_T$  процесс коррозии ускоряется. В соответствии с результатами исследований Е.А. Гузеева, В.П. Селяева, О.Б. Чупичева это связано с процессами, происходящими в объеме материала при его нагружении (от уплотнения до образования дефектов и микротрещин), которые влияют на диффузию агрессивной среды в композит.

Для определения опытных значений параметров длительной прочности нагруженного и корродирующего бетона (диаграммы « $\delta_{кр}^{*,\sigma} - \zeta$ ») разработана установка, позволяющая прикладывать расчетное сжимающее усилие на образец, помещенный в жидкую среду заданной агрессивности сохраняя нагруженный образец в вертикальном положении. Методика экспериментальных определений этих параметров включает следующие этапы.

Первая серия призм будет исследована с целью определения параметра  $\delta_{кр}^{*,0}$ . Для этого бетонные образцы будут помещены в жидкую среду заданной агрессивности (при этом параметр степени агрессивности раствора остается неизменен для всех серий испытаний) в вертикальном положении и выдержаны в течение заданного времени  $t$ . После этого путем приложения силового воздействия призмы доводятся до разрушения с фиксацией параметра разру-

шающего уровня нагрузки  $\zeta^*$ . Вторая серия опытных образцов будет испытана в течение времени  $t$  путем одновременного приложения среднего воздействия и силовой нагрузки с параметром  $\zeta = \zeta_{\text{л}}$ . После этого путем увеличения силового воздействия призмы доводятся до разрушения с фиксацией параметра разрушающего уровня нагрузки  $\zeta_{\text{л}}$ . Третья серия образцов будет испытана аналогично второй с тем отличием, что в ней параметр силовой нагрузки принимается равным значению  $\zeta = \zeta_{\text{т}}$ . Измерение параметров деформирования и разрушения бетонных образцов позволит получить характерные точки диаграммы « $\delta_{\text{кр}}^{*,\sigma} - \zeta$ ».

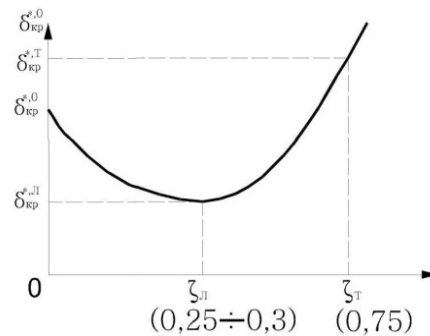


Рисунок 2 – Схема изменения параметра  $\delta_{\text{кр}}^{*,\sigma}$  в области сжатия в зависимости от уровня напряжений  $\zeta$  (\* – средовое воздействие,  $\sigma$  – силовое нагружение)

### Вывод

Предложенная методика оценки предельной глубины повреждения нагруженного и корродирующего бетона позволит получить новые опытные данные о параметрах его длительной прочности, необходимые для расчета остаточного ресурса и оценки живучести коррозионно повреждаемых конструктивно и физически нелинейных железобетонных стержневых систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Еще раз о конструктивной безопасности и живучести зданий [Текст] / В.М. Бондаренко и др. Вестник отделения строительных наук РААСН. – 2007. – № 11.
2. Попеско, А.И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии [Текст] / А.И. Попеско. – СПб.: ГАСУ, 1996. – 182 с.
3. Клюева, Н.В. Предложения к расчету живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструкций [Текст] / Н.В. Клюева // Бетон и железобетон. – 2008. – №3. – С. 22-26.

#### Клюева Наталья Витальевна

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство»  
 Тел.: +7 (4862) 76-03-72  
 E-mail: oantc@mail.ru

#### Дорофеев Алексей Анатольевич

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
 Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
 Тел.: +7 (4862) 76-03-72  
 E-mail: oantc@mail.ru

KLYUEVA N.V., DOROFEYEV A.A.

## TO THE ESTIMATION OF LIMITING DAMAGING DEPTH IN LOADED AND CORROSIVE CONCRETE

*This paper reports the analysis carried out on parameters of the damage depth in a loaded and corrosive concrete unit affecting its long-term strength. In this connection various stressed-*

*deformed conditions (deflected modes) of the unit before and after crack formation are considered. For the accepted diagram of corrosive damages there is written down a damage function which allows calculating the residual source of force resistance in concrete and reinforced concrete elements damaged by corrosion. The system of methods for the experimental definition of test parameter values of long-term strength for loaded and corroded concrete is offered.*

**Keywords:** *corrosive damage, power resistance, damage depth, long-term strength.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Bondarenko, V.M. Ewe raz o konstruktivnoj bezopasnosti i zhivuchesti zdaniy [Tekst] / V.M. Bondarenko i dr. Vestnik otdeleniya stroitel'nyh nauk RAASN. – 2007. – №11.
2. Popesko, A.I. Rabotosposobnost' zhelezobetonnyh konstrukcij, podverzhennyh korrozii [Tekst] / A.I. Popesko. – SPb.: GASU, 1996. – 182 s.
3. Klyueva, N.V. Predlozhenija k raschetu zhivuchesti korrozionno povrezhdaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij [Tekst] / N.V. Klyueva // Beton i zhelezobeton. – 2008. – №3. – S. 22-26.

### **Klyueva Natalia Vitalevna**

State university ESPC, Orel

Doctor of technical science, professor of department «City building and an economy»

Ph.: +7(4862) 76-03-72

E-mail: oantc@mail.ru

### **Dorofeev Alexey Anatolevich**

State university ESPC, Orel

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

Ph.: +7(4862) 76-03-72

E-mail: oantc@mail.ru



## УРАВНЕНИЕ КРАЕВОГО ШАРНИРА ТЕКУЧЕСТИ ДЛЯ ПЛАСТИНОК ЛИНЕЙНО-ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

*В статье рассматривается задача предельного равновесия пластинок линейно-переменной толщины. Получено выражение для определения разрушающей нагрузки, из которого можно найти уравнение краевого шарнира текучести. В результате численного решения дифференциального уравнения краевого шарнира текучести установлено, что его контур может быть описан логарифмической функцией. Показано, что пластинки линейно-переменной толщины экономичнее пластинок постоянной жесткости, имеющих один и тот же объем.*

**Ключевые слова:** предельное равновесие, схема разрушения, разрушающая нагрузка, краевой шарнир текучести, работа предельных моментов.

Задача предельного равновесия пластинок, нагруженных сосредоточенной силой, исследовалась в работах [1-3]. При таком виде нагрузки для достаточно вытянутых пластинок в предельном состоянии образуется краевой шарнир текучести, разделяющий пластинку на упругую и пластическую зоны. В монографии [2] А.Р. Ржаницын для пластинок постоянной толщины, имеющих криволинейный шарнирно опертый контур, получил уравнение краевого шарнира текучести в виде логарифмической спирали  $r = Ae^{c\varphi}$ , где произвольные постоянные  $A$  и  $c$  определяются координатами выхода шарнира текучести на опорный контур. Если значение параметра  $c = 0$ , то логарифмическая спираль вырождается в дугу окружности.

Рассмотрим решение задачи по выводу уравнения краевого шарнира текучести для жестко заземленных пластинок линейно-переменной толщины, у которых высота  $h$  выражается функцией:

$$h = h_0 + kr \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $h_0$  – толщина пластинки в точке приложения сосредоточенной силы;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $r$  и  $\varphi$  – полярные координаты.

Величину предельного погонного момента  $m_T$  можно определить по известной формуле:

$$m_T = \sigma_T \int_{-h/2}^{h/2} z dz = 0,25\sigma_T h^2, \quad (2)$$

что соответствует предельной эпюре нормальных напряжений по высоте пластинки в виде двух прямоугольников. Подставив выражение (1) в (2), получим:

$$m_T = 0,25\sigma_T (h_0 + kr \cos \varphi)^2. \quad (3)$$

Рассмотрим полигональную пластинку, нагруженную сосредоточенной силой  $P$  (рис. 1). Форму ее разрушения можно представить в виде пирамиды с вершиной в точке  $O$  и с ребрами – цилиндрическими шарнирами текучести, идущими в вершины опорного контура. Высота пирамиды, то есть прогиб под силой  $P$  в предельном состоянии является неопределенной величиной и ее можно принять равной единице. В этом случае работа внешних сил будет равна самой силе  $P$ .

Работа предельных моментов по всей длине цилиндрического шарнира текучести может быть найдена следующим образом:

$$U = 0,25\sigma_T \theta_i \int_0^{r_i} (h_0 + kr \cos \varphi_i)^2 dr = 0,25\sigma_T \theta_i r_i \left( h_0^2 + h_0 k r_i \cos \varphi_i + \frac{k^2}{3} r_i^2 \cos^2 \varphi_i \right). \quad (4)$$

Для всей пластинки величина разрушающей силы равна алгебраической сумме работ внутренних сил по всем шарнирам текучести. С учетом результатов, приведенных в работе [3], получим:

$$P_{разр} = 0,25\sigma_{\tau} \times \sum_{i=1}^n \left[ \left( h_0^2 + h_0 k r_i \cos \varphi_i + \frac{k^2}{3} r_i^2 \cos^2 \varphi_i \right) \times (ctg \alpha_i + ctg \beta_i) \right], \quad (5)$$

где  $n$  – число сторон контура краевого шарнира текучести, а остальные обозначения приведены на рисунке 1.

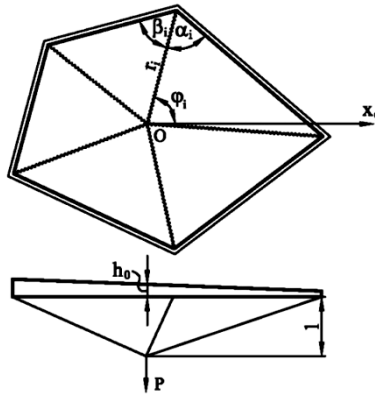


Рисунок 1 – Схема разрушения полигональной пластинки, нагруженной сосредоточенной силой  $P$

Для жестко защемленных пластинок, нагруженных сосредоточенной силой  $P$ , схему разрушения можно также принять пирамидальной (конической). В этом случае кроме радиальных шарниров текучести должны образовываться краевые (периферийные) шарниры текучести, идущие по контуру, ограничивающему область разрушения. Эта область может совпадать с защемленным контуром пластинки (рисунок 2, а), а может и лежать внутри него (рисунок 2, б). Для достижения геометрической изменяемости пластинки достаточно образования одного замкнутого краевого шарнира текучести.

В случае линейного изменения толщины пластинки работа внутренних сил в радиальных шарнирах текучести будет определяться из выражения:

$$U_p = 0,25\sigma_{\tau} \sum_{i=1}^n \theta_i \int_0^{r_i} (h_0 + k r_i \cos \varphi_i)^2 dr. \quad (6)$$

Для определения разрушающей нагрузки к этой работе необходимо прибавить работу предельных моментов в краевых шарнирах текучести, которую с учетом результатов, полученных в [2, 3], можно записать в виде выражения:

$$U_{\kappa} = 0,25\sigma_{\tau} \int_0^{2\pi} (h_0 + k r \cos \varphi)^2 \left( 1 + \frac{r'^2}{r^2} \right) d\varphi. \quad (7)$$

Тогда выражение для определения разрушающей нагрузки примет следующий вид:

$$P_{разр} = 0,25\sigma_{\tau} \int_0^{2\pi} (h_0 + k r \cos \varphi)^2 \left( 1 + \frac{r'^2}{r^2} \right) d\varphi + \\ + 0,25\sigma_{\tau} \int_0^{2\pi} \left( h_0^2 + h_0 k r \cos \varphi + \frac{k^2}{3} r^2 \cos^2 \varphi \right) \left( 1 + \frac{2r'^2}{r^2} - \frac{r''}{r} \right) d\varphi, \quad (8)$$

или в развернутом виде:

$$P_{разр} = 0,25\sigma_{\tau} \int_0^{2\pi} \left( 2h_0^2 + 3h_0 k r \cos \varphi + \frac{4}{3} k^2 r^2 \cos^2 \varphi + 3h_0^2 \frac{r'^2}{r^2} + 4h_0 k \frac{r'^2}{r} \cos \varphi + \right. \\ \left. + \frac{5}{3} k^2 r'^2 \cos^2 \varphi - h_0^2 \frac{r''}{r} - h_0 k r'' \cos \varphi - \frac{k^2}{3} r r'' \cos^2 \varphi \right) d\varphi. \quad (9)$$

Разрушающая нагрузка для пластинки с криволинейным контуром и краевым шарниром вдоль этого контура может быть найдена путем подстановки в выражение (9) уравнения

контура пластинки и его первой и второй производных.

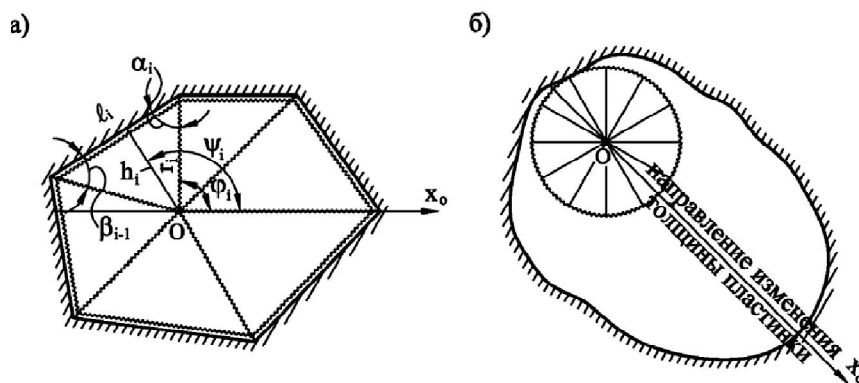


Рисунок 2 – К расчету жестко заземленных пластинок, нагруженных сосредоточенной нагрузкой

В случае приложения сосредоточенной силы не в центре круглой пластинки, а также в случае любого другого криволинейного контура (например, эллипса) выражение, стоящее под знаком интеграла в (9), принимает громоздкую форму, и, как правило, интеграл не может быть выражен через элементарные функции. В этих случаях необходимо прибегать к приближенным методам вычисления интеграла.

Форму кривой краевого шарнира текучести  $r(\varphi)$  найдем из условия минимума разрушающей нагрузки, определяемого из уравнения Лагранжа-Эйлера:

$$\frac{\partial F}{\partial r} - \frac{d}{d\varphi} \frac{\partial F}{\partial r'} + \frac{d^2}{d\varphi^2} \frac{\partial F}{\partial r''} = 0, \quad (10)$$

где  $F$  – подынтегральное выражение в (9). Проведем необходимые вычисления:

$$\frac{\partial F}{\partial r} = 3h_0k \cos \varphi + \frac{8}{3} k^2 r \cos^2 \varphi - 6h_0^2 \frac{r'^2}{r^3} - 4h_0k \frac{r'^2}{r^2} \cos \varphi + h_0^2 \frac{r''}{r^2} - \frac{k^2}{3} r'' \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{\partial F}{\partial r'} = 6h_0^2 \frac{r'}{r^2} + 8h_0k \frac{r'}{r} \cos \varphi + \frac{10}{3} k^2 r' \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{\partial F}{\partial r''} = -\frac{h_0^2}{r} - h_0k \cos \varphi - \frac{k^2}{3} r \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{d}{d\varphi} \frac{\partial F}{\partial r'} = -8h_0k \frac{r'}{r} \sin \varphi - \frac{10}{3} k^2 r' \sin 2\varphi - 12h_0^2 \frac{r'^2}{r^3} - 8h_0k \frac{r'^2}{r^2} \cos \varphi +$$

$$+ 6h_0^2 \frac{r''}{r^2} + 8h_0k \frac{r''}{r} \cos \varphi + \frac{10}{3} k^2 r'' \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{d}{d\varphi} \frac{\partial F}{\partial r''} = h_0k \sin \varphi + \frac{k^2}{3} r \sin 2\varphi + h_0^2 \frac{r'}{r^2} - \frac{k^2}{3} r' \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{d^2}{d\varphi^2} \frac{\partial F}{\partial r''} = h_0k \cos \varphi + \frac{2}{3} k^2 r \cos 2\varphi + \frac{k^2}{3} r' \sin 2\varphi + \frac{2}{3} k^2 r' \sin 2\varphi -$$

$$- \frac{k^2}{3} r'' \cos^2 \varphi - 2h_0^2 \frac{r'^2}{r^3} + h_0^2 \frac{r''}{r^2}.$$

После подстановки этих выражений в уравнение (10) и выполнения преобразований, получим:

$$-r''(Br + 2Ar^2 \cos \varphi + 6Cr^3 \cos^2 \varphi) + r'^2(B + Ar \cos \varphi) + r'(2Ar^2 \sin \varphi + 6,5Cr^3 \sin 2\varphi) + r^3(A \cos \varphi + 4Cr \cos^2 \varphi + Cr \cos 2\varphi) = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } A = 4h_0k, \quad B = 4h_0^2, \quad C = 2k^2/3. \quad (12)$$

Дифференциальное уравнение (11) решить аналитически не представляется возмож-

ным, поэтому будем решать его приближенно одним из численных методов.

А.Р. Ржаницын [3] определял уравнение краевого шарнира текучести для пластинок постоянной толщины из условия минимума разрушающей нагрузки. Эта же формула была получена в работе Я.Б. Львина [1] из предположения, что работа предельных моментов в краевом шарнире текучести равна работе предельных моментов на радиальных шарнирах текучести. Если это свойство краевого шарнира текучести справедливо и для пластинок переменного сечения, то дифференциальное уравнение краевого шарнира текучести для этих пластинок может быть получено более простым путем.

Приравняв слагаемые правой части выражения (8) и проведя необходимые преобразования, получим:

$$h_0 k r \cos \varphi + \frac{2}{3} k^2 r^2 \cos^2 \varphi - h_0^2 \frac{r'^2}{r^2} + \frac{k^2}{3} r'^2 \cos^2 \varphi + h_0^2 \frac{r''}{r} + h_0 k r'' \cos \varphi + \frac{k^2}{3} r r'' \cos^2 \varphi = 0.$$

Подставив в это выражение соотношения (12) и сгруппировав члены относительно производных, запишем:

$$r''(Ar^2 \cos \varphi + Br + 2Cr^3 \cos^2 \varphi) + r'^2(-B + 2Cr^2 \cos^2 \varphi) + r^3(A \cos \varphi + 4Cr \cos^2 \varphi) = 0. \quad (13)$$

Сравнение выражений (11) и (13) показывает, что они отличаются друг от друга. Однако это обстоятельство не является определяющим в решении вопроса о правомерности использования свойства равенства работ предельных моментов для краевого и радиальных шарниров текучести к пластинкам переменного сечения. Для окончательного выяснения этого вопроса необходимо произвести численное решение обоих уравнений на каком-либо конкретном примере и по результатам решений сделать соответствующие выводы.

Определим положение краевого шарнира текучести для круглой жестко защемленной пластинки радиусом 30 см, нагруженной сосредоточенной силой (рисунок 3). Изменение толщины пластинки идет в направлении полярной оси. Высота пластинки в месте приложения нагрузки  $h_0 = 2$  см, коэффициент изменения толщины  $k = -0,02$ . Необходимые расчетные данные показаны на рисунке 3.

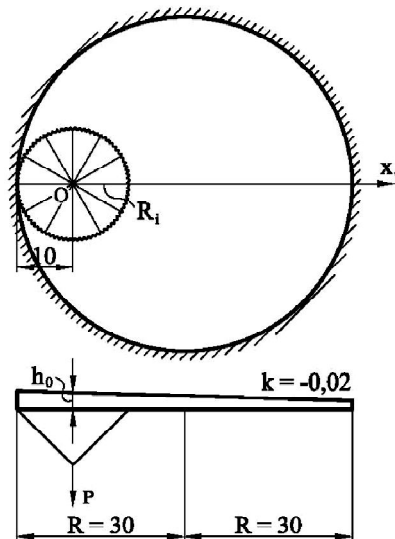


Рисунок 3 – К расчету круглой пластинки переменной толщины, нагруженной сосредоточенной силой

Решение дифференциальных уравнений (11) и (13) будем производить методом конечных разностей. В этом случае значения производных  $r'$  и  $r''$ , входящие в эти уравнения, можно представить следующим образом:

$$r' = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{2\psi}; \quad r'' = \frac{R_{i+1} - 2R_i + R_{i-1}}{\psi^2},$$

где  $\psi$  – принятый шаг угла (для нашего случая  $\psi = \pi/6$ ).

Подставляя в уравнения (11) и (13) выражения для производных  $r'$  и  $r''$ , записанных в конечных разностях, получим две системы нелинейных алгебраических уравнений, решая которые можно найти искомые значения  $R_i$ . В общем случае количество уравнений в системах будет зависеть от принятого шага угла  $\psi$ . Для нашего случая их количество в каждой из систем равно 11.

Полученные системы уравнений имеют очень громоздкий вид, поэтому они здесь не приводятся. Для решения систем уравнений использовался вычислительный комплекс «MathCAD». Результаты численного решения обеих систем нелинейных алгебраических уравнений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты численного решения дифференциальных уравнений (11) и (13)

$\varphi_i$ , град	0	30	60	90	120	150
$R_i$ из (11)	12,424	12,246	11,697	11,041	10,482	10,123
$R_i$ из (13)	8,167	8,308	8,623	9,058	9,516	9,867
$\varphi_i$ , град	180	210	240	270	300	330
$R_i$ из (11)	10,000	10,123	10,482	11,041	11,697	12,246
$R_i$ из (13)	10,000	9,867	9,516	9,058	8,623	8,308

Из приведенной таблицы видно, что значения  $R_i$ , найденные из (11) и (13) при одних и тех же значениях углов  $\varphi$ , не равны между собой. Это означает, что свойство равенства работ предельных моментов краевого и радиальных шарниров текучести для пластинок линейно изменяющейся толщины не соблюдается.

Анализируя результаты численного решения дифференциального уравнения (11), можно заметить, что его форма представляет собой окружность с центром в точке с координатами  $0^0, 1,212$  ( $R = 11,212$ ). В этом легко убедиться подстановкой значений  $R_i$  из таблицы 1 в уравнение окружности:

$$r^2 + 1,212^2 - 2,424r \cos\varphi - 11,212^2 = 0. \quad (14)$$

Для определения величины разрушающей нагрузки необходимо по найденным численным значениям  $R_i$  (см. таблицу 1) записать уравнение краевого шарнира текучести на каждом из участков, расположенных между двумя соседними шарнирами  $R_i$  и  $R_{i+1}$ . В качестве аппроксимирующей удобно принять логарифмическую функцию  $r = Ae^{c\varphi}$ , где постоянные  $A$  и  $c$  определяются для каждого из интервалов по отдельности. Записав уравнения, описывающие крайевой шарнир текучести на каждом участке, и подставив их в выражение (9), получим значение разрушающей нагрузки  $P_{разр1}^{перем} = 10,720\sigma_T$ .

Для определения несущей способности пластинки можно также воспользоваться уравнением (14), предварительно выразив из него уравнение краевого шарнира текучести  $r(\varphi)$ . В этом случае необходимо учесть, что центр окружности будет несколько смещен относительно точки приложения сосредоточенной нагрузки. Поэтому толщина пластинки  $h_0$  в центре этой окружности будет несколько меньше. Подставляя найденные значения высоты пластинки в центре разрушения ( $h_0$ ) и уравнение краевого шарнира текучести  $r(\varphi)$  в (9), найдем значение разрушающей нагрузки  $P_{разр2}^{перем} = 9,883\sigma_T$ , что отличается от точного значения на

$$\frac{P_{разр2}^{перем} - P_{разр1}^{перем}}{P_{разр1}^{перем}} \cdot 100\% = \frac{10,720 - 9,883}{10,720} \cdot 100\% = 7,81\%.$$

Для пластинки постоянной жесткости с толщиной  $h_0 = V_{перем}/A$  значение разрушающей нагрузки равно  $P_{разр}^{пост} = 8,043\sigma_T$ , что меньше несущей способности пластинки, линейно-переменной толщины на

$$\frac{P_{разр}^{перем} - P_{разр}^{пост}}{P_{разр}^{перем}} \cdot 100\% = \frac{10,720 - 8,043}{10,720} \cdot 100\% = 24,98\%.$$

Таким образом, пластинки линейно-переменной жесткости экономичнее пластинок

постоянного сечения, имеющих один и тот же объем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львин, Я.Б. К вопросу о зависимости между разрушающими нагрузками для плиты защемленной и плиты, свободно опертой по контуру [Текст] / Я.Б. Львин // Труды Воронежского инженерно-строительного института. – 1950. – № 2.
2. Ржаницын, А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Госстройиздат, 1954. – 287 с.
3. Ржаницын, А.Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Наука, 1983. – 288 с.

### **Коробко Виктор Иванович**

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

### **Морозов Станислав Александрович**

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: morozov\_stas\_57@mail.ru

---

KOROBKO V.I., MOROZOV S.A.

## THE EQUATION OF THE REGIONAL HINGE OF FLUIDITY FOR PLATES OF THE LINEARLY-VARIABLE THICKNESS

*In article the problem of limiting balance of plates of a linearly-variable thickness is considered. Expression for ultimate load definition from which it is possible to find the equation of the regional hinge of fluidity is received. As a result of the numerical decision of the differential equation of the regional hinge of fluidity it is established that its contour can be described logarithmic function. It is shown that plates of a linearly-variable thickness are more economic than the plates of constant rigidity having the same volume.*

**Keywords:** limiting balance, the scheme of destruction, breaking load, the regional hinge of fluidity, work of the limiting moments.

## BIBLIOGRAPHY

1. L'vin, Ya.B. K voprosu o zavisimosti mezhdru razrushajuwimi nagruzkami dlja plity zawemlennoj i plity, swobodno opertoj po konturu [Tekst] / Ya.B. L'vin // Trudy Voronezhskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta. – 1950. – № 2.
2. Rzhanicyn, A.R. Raschet sooruzhenij s uchetom plasticheskikh svojstv materialov [Tekst] / A.R. Rzhanicyn. – M.: Gosstrojizdat, 1954. – 287 s.
3. Rzhanicyn, A.R. Predel'noe ravnovesie plastinok i obolochek [Tekst] / A.R. Rzhanicyn. – M.: Nauka, 1983. – 288 s.

### **Korobko Victor Ivanovich**

State university ESPC, Orel  
Doctor of technical science, professor of department «Building designs and materials»  
Ph.: +7(4862) 73-43-95  
E-mail: center\_epb@mail.ru

### **Morozov Stanislav Aleksandrovich**

State university ESPC, Orel  
Post-graduate student of department «Building designs and materials»  
E-mail: morozov\_stas\_57@mail.ru

КОРОБКО В.И., ЧЕРНЯЕВ А.А.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАВНОБЕДРЕННЫХ ТРЕУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИНОК С КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТНОШЕНИЯ КОНФОРМНЫХ РАДИУСОВ

*Рассматриваются упругие изотропные пластинки в виде равнобедренных треугольников с комбинациями шарнирного опирания и жесткого защемления по сторонам. Для определения основной частоты их свободных колебаний предлагается использовать в качестве основного аргумента новую безразмерную геометрическую характеристику плоской области – отношение внутреннего и внешнего конформных радиусов. Приведено сравнение рассматриваемого в статье нового аргумента с известным аналогом, указаны преимущества первого.*

**Ключевые слова:** равнобедренные треугольные пластинки, комбинированные граничные условия, свободные колебания, основная частота колебаний, отношение внутреннего и внешнего конформных радиусов.

Пластинки в виде равнобедренных треугольников находят широкое применение в качестве несущих элементов конструкций в специальном машиностроении (судо-, авиа- и ракетостроении), в строительстве, в настилах косых мостов, автомобильных развязок, продольная ось которых наклонна по отношению к препятствию. Часто треугольную форму придают днищам бункеров и силосов. В последнем случае пластинки жестко защемляют по равным сторонам и свободно опирают по третьей (основанию треугольника).

Точные решения задачи по определению основной частоты свободных колебаний известны для пластинок в виде равнобедренных треугольников с углами при основании  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  шарнирно опертых по контуру и для пластинки в виде правильного треугольника с четырьмя комбинациями шарнирного опирания и жесткого защемления по контуру [1]. Среди приближенных методов известно решение, полученное методом Релея-Ритца для равнобедренных пластинок, основание которых жестко защемлено (консольная пластинка) [2].

Применение вариационных методов (Релея-Ритца, Галеркина и др.) к решению рассматриваемой задачи существенно затруднено из-за сложности граничных условий. И как правило в таких случаях прибегают к численным методам (МКР, МКЭ и др.), реализуемым с помощью ЭВМ, и часто внедренных в расчетно-программные комплексы (SCAD, АРМ WinMachine и др.). Несмотря на их эффективность, при расчете пластинок зачастую теряется физический смысл задачи и невозможно отследить появление ошибок.

Геометрические методы позволяют избежать решения сложных дифференциальных уравнений, не требуют мощных ЭВМ, и дают возможность, не проводя расчетов, сравнить интегральные физические характеристики (ИФХ) пластинок (в их числе и основная частота колебаний) различных форм по некоторому геометрическому параметру, зависящему только от формы области. Среди этих методов вероятно самым эффективным является метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), который получил широкое применение для решения двумерных задач теории упругости и строительной механики (в том числе для задачи свободных колебаний пластинок). В МИКФ таким параметром является интегральная характеристика плоской области – коэффициент формы  $K_f$ , подробные сведения о которой, как и самом методе, приведены в работе [3].

В предыдущей работе авторов [4] рассматривалась задача определения основной частоты колебаний пластинок с однородными граничными условиями (шарнирное опирание по контуру, жесткое защемление по контуру). В качестве основного аргумента использовалась

новая безразмерная характеристика плоской области – *отношение внутреннего и внешнего конформных радиусов*  $\dot{r}/\bar{r}$ . При этом область значений всего множества основных частот колебаний для пластинок с выпуклым контуром оказалась значительно уже (в 2-3 раза), чем при использовании аналогичного аргумента  $K_f$  (рисунок 1). Так же кривая, образующая нижнюю границу значений основной частоты колебаний, объединяет большее множество форм пластинок, чем при использовании  $K_f$ . Эти два преимущества позволят более эффективно использовать методику МИКФ не только для случая однородных граничных условий, но и комбинированных с использованием нового геометрического аргумента –  $\dot{r}/\bar{r}$ . Рассмотрим его применение.

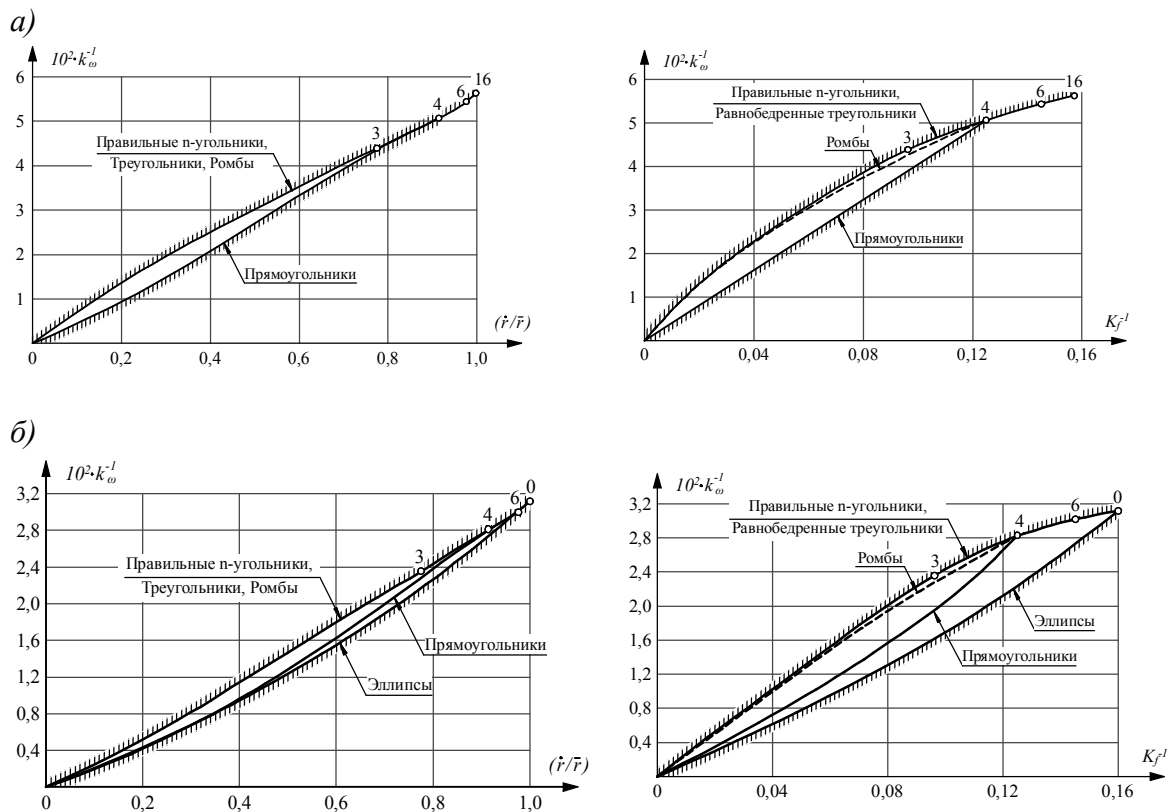


Рисунок 1 – Кривые  $k_{\omega}^{-1} - (\dot{r}/\bar{r})$  и  $k_{\omega}^{-1} - K_f^{-1}$ :

*а – шарнирно опертые пластинки; б – жестко защемленные пластинки*

Для реализации методики МИКФ к решению рассматриваемой задачи с комбинированными граничными условиями необходимо построить опорные кривые «основная частота колебаний – отношение внутреннего и внешнего конформных радиусов», ограничивающие все множество значений основной частоты колебаний для пластинок с выпуклым контуром. Одну из таких граничных кривых образуют пластинки в виде равнобедренных треугольников. По ним подбираются опорные решения при реализации методики МИКФ для расчета пластинок в форме равнобедренной трапеции. В этом заключается практическая значимость и актуальность рассматриваемых в настоящей статье форм пластинок.

Представим значения основной частоты колебаний выражением:

$$\omega_0 = k_{\omega} \frac{\sqrt{D/m}}{A}, \quad (1)$$

где  $k_{\omega}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы пластинки и ее граничных условий;  $D$  – цилиндрическая жесткость;  $A$  – площадь;  $m$  – масса единицы площади пластинки.

Все множество комбинаций условий шарнирного опирания и жесткого защемления по отдельным сторонам треугольных пластинок (за исключение однородных граничных усло-



вий) показано на рисунке 2.

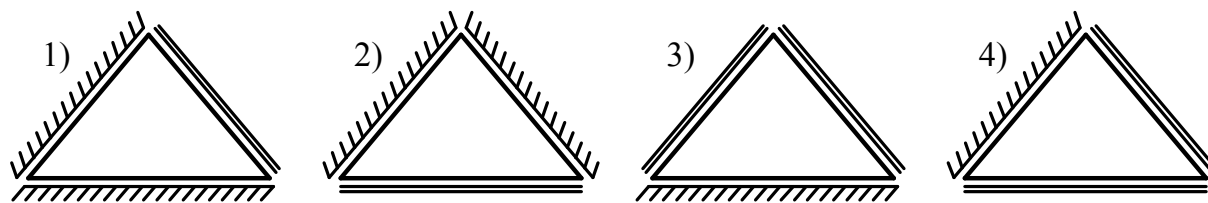


Рисунок 2 – Комбинации граничных условий: «жесткое защемление» – «шарнирное опирание» для равнобедренных треугольных пластинок

Сведем в таблицу 1 значения основной частоты свободных колебаний пластинок, полученные с помощью МКЭ с использованием программного комплекса «SCAD\_11.3» (с числом конечных элементов не менее 1000). По табличным данным построим кривые значений обратной величины  $k_{\omega}$  в зависимости от отношения  $\dot{r}/\bar{r}$  (рисунок 3). На рисунке добавлены кривые для шарнирно опертых (кривая III) и жестко защемленных пластинок (кривая Ж), взятые из статьи [4].

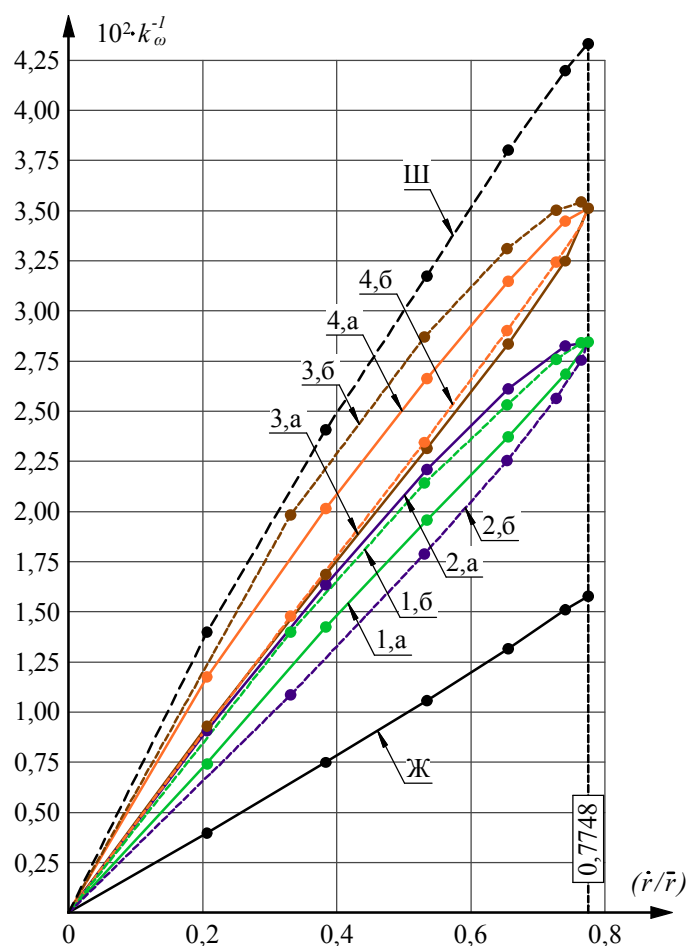


Рисунок 3 – Кривые  $k_{\omega}^{-1} - (\dot{r}/\bar{r})$  для пластинок в виде равнобедренных треугольников с комбинациями граничных условий по рисунку 2

Как показали расчеты, значения  $k_{\omega}$  для пластинок в виде равнобедренных треугольников с углом  $\alpha \leq 60^{\circ}$  и  $\alpha \geq 60^{\circ}$  образуют две отдельные кривые. Поэтому на представленном рисунке соответствующие решения обозначены буквами *a* и *б*. Следует обратить внимание на тот факт, что для пластинок с однородными граничными условиями для обоих подмножеств треугольных пластинок эти кривые сливаются в одну.

Таблица 1 – Сопоставление решений, полученных с помощью МКЭ, с решениями, найденными по аппроксимирующим функциям

«1»	а)	$\alpha$ , град ▶		10	20	30	40	50	60
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,2063	0,3837	0,5342	0,6556	0,7411	0,7748
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	150,536	69,245	50,916	41,925	37,088	35,037
			(2)	150,517	69,271	50,847	42,033	36,959	35,096
	$\Delta$ , %		<b>-0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,14</b>	<b>0,26</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,17</b>	
	б)	$\alpha$ , град ▶		60	65	70	75	80	85
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,7748	0,7642	0,727	0,6541	0,5308	0,3309
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	35,037	35,104	36,259	39,300	46,727	71,168
(3)			34,973	35,106	36,195	39,287	46,785	71,053	
$\Delta$ , %		<b>-0,18</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,12</b>	<b>-0,16</b>		
«2»	а)	$\alpha$ , град ▶		10	20	30	40	50	60
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,2063	0,3837	0,5342	0,6556	0,7411	0,7748
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	106,918	60,369	45,203	38,297	35,219	35,037
			(4)	106,893	60,363	45,213	38,254	35,243	34,991
	$\Delta$ , %		<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,11</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,13</b>	
	б)	$\alpha$ , град ▶		60	65	70	75	80	85
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,7748	0,7642	0,727	0,6541	0,5308	0,3309
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	35,037	36,246	38,892	44,129	55,550	91,416
(5)			35,213	36,330	39,021	44,130	55,511	91,705	
$\Delta$ , %		<b>0,50</b>	<b>0,23</b>	<b>0,33</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,07</b>	<b>0,32</b>		
«3»	а)	$\alpha$ , град ▶		10	20	30	40	50	60
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,2063	0,3837	0,5342	0,6556	0,7411	0,7748
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	105,885	58,982	43,090	35,160	30,691	28,414
			(6)	105,879	58,995	43,078	35,177	30,683	28,427
	$\Delta$ , %		<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,05</b>	
	б)	$\alpha$ , град ▶		60	65	70	75	80	85
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,7748	0,7642	0,727	0,6541	0,5308	0,3309
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	28,414	28,057	28,451	30,116	34,659	50,134
(7)			28,225	28,005	28,316	30,084	34,729	49,994	
$\Delta$ , %		<b>-0,67</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,11</b>	<b>0,20</b>	<b>-0,28</b>		
«4»	а)	$\alpha$ , град ▶		10	20	30	40	50	60
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,2063	0,3837	0,5342	0,6556	0,7411	0,7748
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	84,107	49,260	37,307	31,645	28,930	28,414
			(8)	84,189	49,215	37,358	31,644	28,964	28,460
	$\Delta$ , %		<b>0,10</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,00</b>	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>	
	б)	$\alpha$ , град ▶		60	65	70	75	80	85
		$\dot{r}/\bar{r}$ ▶		0,7748	0,7642	0,727	0,6541	0,5308	0,3309
		Решение, $k_\omega$	[МКЭ]	28,414	29,102	30,832	34,405	42,328	67,125
(9)			28,535	29,157	30,919	34,428	42,286	67,285	
$\Delta$ , %		<b>0,43</b>	<b>0,19</b>	<b>0,28</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,24</b>		
<b>Примечания:</b>									
1 Значения $\dot{r}/\bar{r}$ взяты из статьи [4].									
2 $\Delta$ – погрешность решений, получаемых по аппроксимирующим функциям.									

С помощью программы «Table Curve\_2D» построены следующие аппроксимирующие функции:

для пластинок по схеме 1, а:

$$k_\omega = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2 + f(\dot{r}/\bar{r})^3}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (2)$$

где  $b = -1,9974$ ;  $c = 0,005149$ ;  $d = 10,995$ ;  $e = 0,13055$ ;  $f = -6,799$ ;

для пластинок по схеме 1, б:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (3)$$

где  $b = -0,9387$ ;  $c = 0,04681$ ;  $d = -0,37362$ ;  $e = -0,05811$ ;

для пластинок по схеме 2, а:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (4)$$

где  $b = -0,9309$ ;  $c = 0,048$ ;  $d = -0,35093$ ;  $e = -0,05884$ ;

для пластинок по схеме 2, б:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (5)$$

где  $b = -1,3918$ ;  $c = 0,03149$ ;  $d = 0,16631$ ;  $e = -0,039627$ ;

для пластинок по схеме 3, а:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2 + f(\dot{r}/\bar{r})^3}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (6)$$

где  $b = -0,8644$ ;  $c = 0,048848$ ;  $d = -0,7457$ ;  $e = -0,06083$ ;  $f = 0,33369$ ;

для пластинок по схеме 3, б:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (7)$$

где  $b = -0,5613$ ;  $c = 0,07421$ ;  $d = -0,8485$ ;  $e = -0,09249$ ;

для пластинок по схеме 4, а:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2 + f(\dot{r}/\bar{r})^3}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (8)$$

где  $b = -0,4601$ ;  $c = 0,06568$ ;  $d = -1,23224$ ;  $e = -0,07942$ ;  $f = 0,40339$ ;

для пластинок по схеме 4, б:

$$k_{\omega} = \frac{1 + b(\dot{r}/\bar{r}) + d(\dot{r}/\bar{r})^2}{c(\dot{r}/\bar{r}) + e(\dot{r}/\bar{r})^2}, \quad (9)$$

где  $b = -1,2004$ ;  $c = 0,04559$ ;  $d = -0,05939$ ;  $e = -0,05684$ .

Функции (2) – (9) могут использоваться для непосредственного расчета равнобедренных треугольных пластинок. Погрешность получаемых решений при использовании этих функций не превышает 0,70%. В дальнейшем они будут применены в составе разрабатываемого программного комплекса по определению основной частоты свободных колебаний пластинок с использованием геометрического аргумента –  $\dot{r}/\bar{r}$ , а также к определению основной частоты колебаний равнобедренных трапецевидных пластинок.

### Выводы

1. Получены функциональные зависимости для определения основной частоты свободных колебаний пластинок в виде равнобедренных треугольников с комбинированными граничными условиями (комбинации шарнирного опирания и жесткого защемления) по параметру  $\dot{r}/\bar{r}$ .

2. Все множество значений основной частоты свободных колебаний рассматриваемых пластинок с комбинированными граничными условиями, представленное в координат-

ной плоскости  $k_{\omega}^{-1} - (\dot{r}/\bar{r})$ , ограничено с двух сторон значениями для пластинок с однородными граничными условиями (шарнирное опирание, жесткое защемление).

3. Расположение равнобедренных треугольных пластинок с комбинированными граничными условиями в порядке уменьшения (или увеличения) основной частоты их свободных колебаний различно для равных углов треугольной пластинки до и после  $60^{\circ}$ , что соответствует правильной треугольной.

Это объясняется тем, что в случае треугольной пластинки со значениями равных углов при основании до  $60^{\circ}$  – самой длинной стороной является основание (см. рисунок 2) и его жесткое защемление (либо шарнирное опирание) придает пластинке более жесткое (либо менее жесткое) закрепление, что ведет к увеличению (либо уменьшению) основной частоты их колебаний. При углах же более  $60^{\circ}$  – длинными являются равные стороны треугольной пластинки, и уже тип их закрепления играет решающую роль в вопросе увеличения (либо уменьшения) основной частоты колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. УНИРС для строителей (Учебно-, научно-исследовательская работа студентов): Учебное пособие для вузов [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1998. – 304 с.
2. Биргер, И.А. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. – Т. 3 [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1901. – 568 с.
3. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
4. Коробко, А.В. Определение основной частоты свободных колебаний пластинок с использованием конформных радиусов [Текст] / А.В. Коробко, А.А. Черняев // Строительство и реконструкция. – 2011. – №1. – С. 12-18.

#### **Коробко Виктор Иванович**

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

#### **Черняев Андрей Александрович**

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-95  
E-mail: center\_epb@mail.ru

---

**KOROBKO V.I., CHERNYAEV A.A.**

### **THE DEFINITION OF THE BASIC FREQUENCY FREE VIBRATIONS OF ISOSCELES TRIANGLES PLATES WITH COMBINED BOUNDARY CONDITIONS WITH USE OF THE RELATION OF CONFORMAL RADIUSSES**

*In the article considered elastic isotropic plates in the form of isosceles triangles with combined hinge a support and rigid a support on parties. For estimation of the basic frequency free vibration of plates is suggested use as the basic argument the new dimensionless characteristic of flat area – the relation internal and external of conformal radiusses. Comparison of new argument considered in article with known analog is resulted, advantages of the first are specified.*

*Keywords: isosceles triangles plates, the combined boundary conditions, free vibration, the basic frequency vibration, the relation internal and external of conformal radiuses.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. UNIRS dlya stroitelej (Uchebno-, nauchno-issledovatel'skaya rabota studentov): Uchebnoe posobie dlya vuzov [Tekst] / V.I. Korobko, A.V. Korobko. – M.: ASV, 1998. – 304 s.
2. Birger, I.A. Prochnost', ustojchivost', kolebaniya. Spravochnik v tryoh tomah. – T. 3 [Tekst] / I.A. Birger. – M.: Mashinostroenie, 1901. – 568 s.
3. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumerny'h zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.
4. Korobko, A.V. Opredelenie osnovnoj chastoty svobodny'h kolebanij plastinok s ispol'zovaniem konformny'h radiusov [Tekst] / A.V. Korobko, A.A. Chernyaev // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2011. – №1. – S. 12-18.

### **Korobko Victor Ivanovich**

State university ESPC, Orel

Doctor of technical science, professor of department «Building designs and materials»

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

E-mail: center\_epb@mail.ru

### **Chernyaev Andrey Aleksandrovich**

State university ESPC, Orel

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

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

E-mail: center\_epb@mail.ru

НЕЖДАНОВ К.К., ЖУКОВ А.Н.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УСИЛЕНИЯ КОНСОЛЕЙ ОДНОЭТАЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

*В статье рассматриваются основные методы усиления консолей железобетонных колонн одноэтажных промышленных зданий. Описываются основные достоинства и недостатки существующих методов. Предлагается новый способ восстановления несущей способности консолей железобетонных колонн одноэтажных промышленных зданий. Разработанное усиление консоли производится путем использования сборной металлической обоймы с применением овального профиля. В работе представлен способ расчета указанных обойм усиления. Выделяются достоинства нового метода по сравнению с существующими методами.*

**Ключевые слова:** исследование, методы усиления, консоль, одноэтажные промышленные здания.

Железобетонные консоли при правильном их расчете и армировании в условиях длительной эксплуатации повреждаются чаще, чем другие участки колонны.

Так, например, на Теплоэлектроцентрали №1 (г. Пенза), построенной в 1943 г., возникли серьезные повреждения железобетонных консолей, предназначенных для опирания стальных подкрановых балок, для кранов грузоподъемностью  $Q = 50/10$  т. Причиной возникновения повреждений консолей явилась коррозия бетона и арматуры, образовавшаяся вследствие выделения сернистого газа при сгорании угля. Более высокие напряжения, возникающие в консолях по отношению к другим участкам колонн, также способствуют коррозионным процессам в бетоне и арматуре.

Следует учитывать, что динамика воздействий от мостовых кранов передается на консоли через подкрановые балки сильнее, чем на другие участки колонн. Очевидно, что в растянутых зонах консолей возникли микротрещины допустимой величины. Коррозия началась с повреждения бетона. Сернистые газы из котельного отделения присутствовали в атмосфере и проникали через микротрещины в защитном слое, толщина которого достигала 75 мм.

При обследовании «турбинного цеха» в 90-х годах прошлого века (через приблизительно 50 лет эксплуатации) было обнаружено, что защитный слой на многих консолях полностью отделился и обрушился. Особенно пострадали участки консолей в зоне непосредственного контакта стальных подкрановых балок с консолями. Рабочая арматура консолей оголилась, и было установлено, что поверхность ее покрыта продуктами коррозии толщиной 0,3...0,2 мм. Очевидно, что появление слоя коррозии на поверхности рабочей арматуры пагубно влияет на консольный участок колонны.

Отрицательное влияние ржавчины сказывается следующим образом. Продукты коррозии увеличивают объем по отношению к объему вступивший в коррозионный процесс стали в 1,81 раза. По сравнению с увеличением объема замерзшей воды (1,09 раза) приращение объема ржавчины в 9 раз больше. Замерзшая вода в стакане железобетонного фундамента легко разрушает стакан.

Бесспорно, что продукты коррозии еще легче разрывают бетон любой прочности, и защитный слой бетона отделяется и осыпается. Сцепление арматуры с бетоном частично или полностью нарушается и несущая способность консоли катастрофически падает!

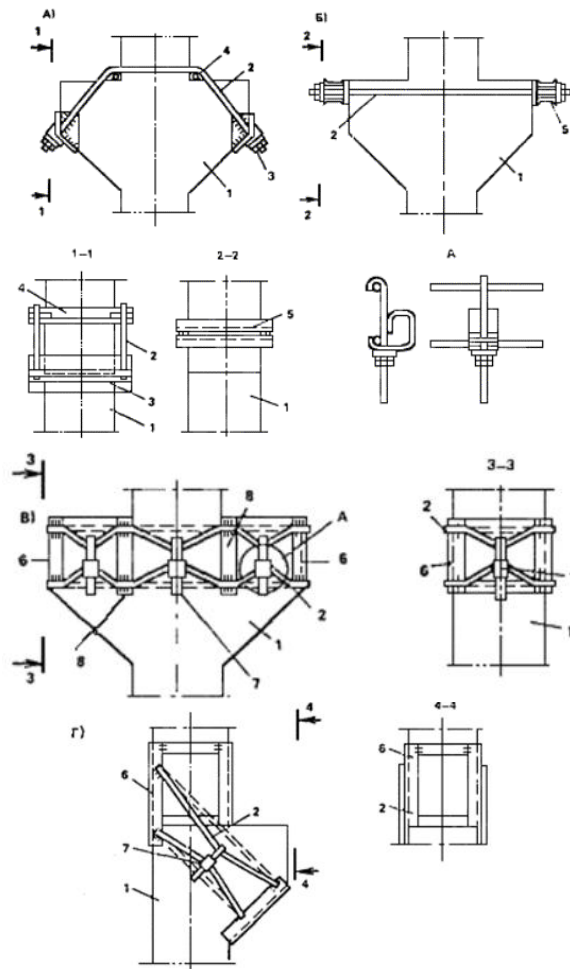
На Теплоэлектроцентрали №1 в «турбинном цехе» необходимо было демонтировать старую турбину массой 100 т и заменить ее новой. То есть консоли колонн необходимо было усилить и обеспечить восприятие опорных реакций от сцепки из двух мостовых кранов грузоподъемностью по  $Q = 50$  т, транспортирующих массу 100 т.

В ходе эксплуатации консолей в промышленном здании возникали множественные трещины, они возникали от действия коррозионных процессов, изгибающего момента и по-

перечной силы от использования кранового оборудования. Когда повреждения доходят до критических значений, требуется усиление консолей.

Проведенное исследование методов усиления железобетонных консолей сооружений позволило выявить следующие технические решения.

В рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений приведено усиление консоли наклонными тяжами, здесь усилие от действия крана передается с поврежденной консоли через затяжку с минимальным эксцентриситетом на нижнюю часть колонны (рисунок 1, А).



**Рисунок 1 – Усиление консолей колонн преднапряженными затяжками [1, с.55]:**  
 А – наклонными тяжами; Б – затяжкой; В – затяжкой замкнутом хомутом со стягиванием его ветвей; Г – наклонной тягой со стягиванием ее ветвей;  
 1 – колонна; 2 – затяжки; 3, 4, 5 – траверсы и упоры; 6, 8 – подкладки; 7 – стяжные крюки

На рисунке показан контур двух симметричных консолей, предназначенных для опирания подкрановых балок. Сечения подкрановых балок, закладные и крепежные детали соединения не представлены. Повреждения, возникшие при эксплуатации, не отображены, причина необходимости усиления не объяснена. Какую часть опорных реакций  $D_{max}$  от смежных подкрановых балок предполагается воспринять элементами усиления не ясно. Мы считаем, что узел крепления показан в масштабе и приходим к выводу, что элемент 4 не обеспечивает требуемого усиления, так как он работает на изгиб и его сечения совершенно недостаточно.

В нашем случае (Теплоэлектроцентральный №1) опорная реакция от смежных подкрановых балок равна примерно 100 т. Предполагаем, что вся опорная реакция воспринимается элементами крепления, т.е. на каждый элемент усиления примерно по 50 т.

Основным недостатком этого метода является невозможность усиления консоли под подкрановой балкой, эта часть консоли часто повреждается, необходима разгрузка консоли

от воздействий подкрановых балок. Для того чтобы разгрузить консоль необходимо остановить основное производство. Такая разгрузка может обходиться предприятию значительными убытками.

На рисунке 1, Б показано усиление консоли посредством двух коробчатых в сечении элементов 5, стянутых друг с другом тяжами 2. В «рекомендации» не указано, какие повреждения возникли в консолях колонны и по какой причине. Исходя из рисунка 1, Б, делаем вывод, что при проектировании консолей была допущена техническая ошибка, и верхние стержни консоли были назначены заниженного диаметра, и растягивающие напряжения в арматуре превысили ее расчетное сопротивление. Арматура стала работать с расчетным сопротивлением по временному сопротивлению  $R_{st}$ , что привело к появлению в консолях вертикальных трещин недопустимой ширины. То есть возникло третье предельное состояние. Также в рекомендациях не пояснено, с какой силой необходимо затягивать тяжи.

Усиление Б не эффективно, т.к. может воспринимать только изгибающий момент от подкрановой баки. При этом отсутствует возможность усиления подкрановой зоны консоли. Как недостаток надо отметить невозможность восприятия поперечной силы данной затяжкой. Преднапряжение данной затяжки осуществляется на торец консоли, который к этому времени поврежден коррозией бетона, что существенно усложняет усиление таким методом.

Усиление 1В, Г работает путем напряжения арматуры, приваренной к уголкам, обрамляющим консоль и верхнюю часть колонны. Натяжение достигается стягиванием параллельной арматуры крюками. Данный способ усиления не эффективен, так же как и способ под буквой Б, потому что не может воспринимать поперечное усилие и требует остановки основного производства.

На рисунке 2 отображены узлы увеличения сечения нижней части колонны. Предполагается, что в подконсольной части колонны новый бетон надежно соединен с усиленной колонной. Каким образом выполнено армирование и как обеспечена совместная работа нового и старого бетона не показано. Недостатком этого метода является то, что при выполнении усиления необходима разгрузка поврежденной консоли.

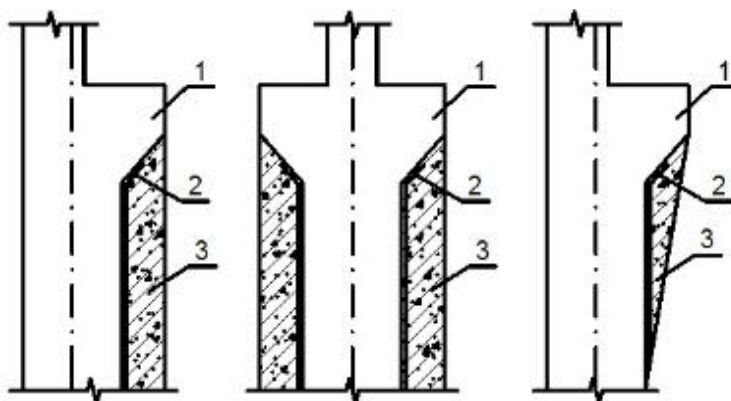
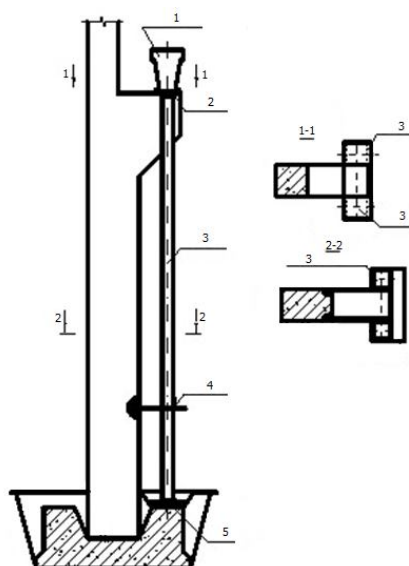


Рисунок 2 – Бетонированием подконсольной части:  
1 – консоль; 2 – арматура; 3 – бетон

На рисунке 3 показан узел усиления консоли колонны путем передачи опорных реакций подкрановых балок на фундамент при помощи подведения двух стальных колонн под подкрановые балки с двух сторон от ослабленной колонны. Недостатком является увеличение габаритов колонны, что не всегда возможно. В узле предусмотрена только одна связь с колонной, что при существенной высоте, на которой расположена консоль (до 20 и более метров), недостаточно, т.к. предельная гибкость  $\lambda = 120$ , а при существенной высоте новых колонн значение гибкости будет выше, что по нормам не допускается. Закрепление новых колонн к старой осуществляется приваривание стержней от новой колонны к арматуре старой, что является безграмотным техническим решением. Достоинство данного метода заключается в простоте включения в работу стальных колонн (например, поддомкрачивание).





**Рисунок 3 – Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн:**  
 1 – подкрановые балки; 2 – разрушающаяся консоль; 3 – стальные колонны;  
 4 – связь стальной колонны с железобетонной; 5 – фундамент

Исследование вышеуказанных методов произведено на основе анализа чертежей без соответствующих расчетов, однако является достаточным для выделения изложенных достоинств и недостатков существующих технических решений по усилению консолей колонн одноэтажных промышленных зданий.

В существующих условиях производства и экономических отношений применение вышеизложенных методов будет приносить убытки либо нарушать технологический процесс в существующем производстве. Поэтому актуальность развития новых методов усиления консолей высока.

На кафедре «Строительные конструкции» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства был разработан способ усиления консолей [2], при котором ослабленная консоль полностью разгружается, при этом не требуется остановки технологического процесса и не наносится никакого вреда основному производству (рисунок 4).

Суть способа заключается в том, что несущую способность консолей восстанавливают сборной стальной обоймой, состоящей из четырех двутавровых профилей, соединенных посредством тяжей с амортизаторами овального типа. При этом все самые напряженные части консоли укрепляются этой обоймой. Сама консоль может вообще не приниматься в расчет, т.к. всю нагрузку в данном случае несет обойма. Восстанавливается геометрическая форма консоли (зона под подкрановой балкой).

Основные воздействия воспринимают овальные профили, что уменьшает материалоемкость по сравнению с обычными профилями, т.к. момент инерции овального профиля на 70% выше, чем у двутавра. Сама обойма воспринимает часть нагрузки, но в расчете мы это не учитываем, что дает дополнительный запас прочности. Расчет данного способа достаточно прост и производится по элементарным формулам сопротивления материалов. Овальный профиль рассчитывается на изгиб, тяжи на растяжение. Нагрузка как для расчета на изгиб, так и для расчета на растяжение находится по линиям влияния от двух сближенных кранов грузоподъемностью 50т каждый.

Для удобства монтажа и с учетом динамики воздействий с каждой стороны консоли (см. рисунок 4) примем подвески из четырех шпилек М24 [3] с площадью поперечного сечения по нарезке  $4,52 \cdot 8 = 28,16 \text{ см}^2$ . То есть по четыре шпильки для подвески к каждому концу амортизатора. Проверка прочности тяжей на растяжение:

$$\sigma = \frac{D_{\max}}{\sum A} \leq \gamma R_y; \sigma = \frac{8263}{4.52 \cdot 8} = 228.51 < 0.7 \cdot 770 = 539 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная опорная реакция от колес крана;  $\sum A$  – суммарная площадь болтов;  $R_y$  – расчетное сопротивление болтов на растяжение.

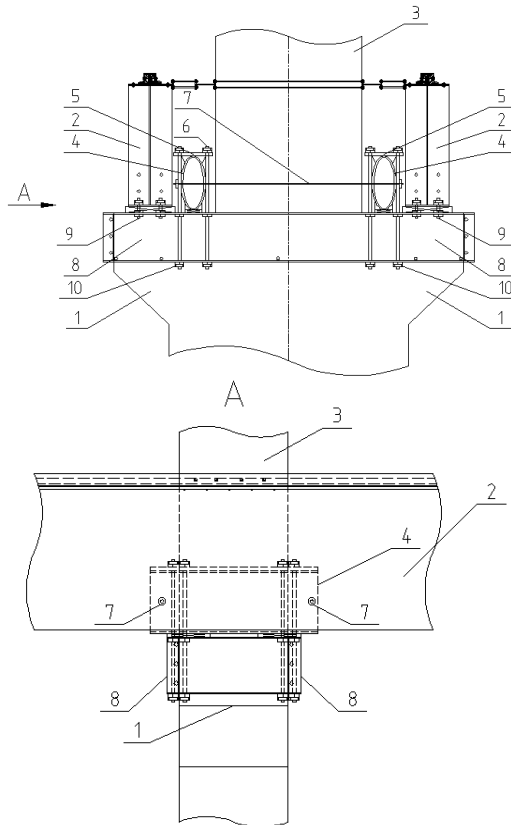


Рисунок 4 – Узел восстановления несущей способности разрушающихся по среднему ряду колонн железобетонных симметричных консолей: 1 – консоль; 2 – подкрановая балка; 3 – колонна; 4 – амортизатор; 5 – фигурная шайба; 6 – тяжи; 7 – горизонтальные тяжи; 8 – стальная обойма; 9 – новые анкерные болты; 10 – рихтующие гайки

Прочность тяжей на растяжение обеспечена с хорошим запасом, так как воздействия динамические. Примем сечение каждого амортизатора из овального профиля с отношением большего габарита овала к меньшему, равному трем.

Нагрузка на единицу его длины:

$$q = \frac{D_{\max}}{l} = \frac{8263}{75} = 110,2 \frac{\text{гН}}{\text{см}}, \quad (2)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная опорная реакция от колес крана;  $l$  – ширина консоли.

Тогда изгибающий момент:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{110,2 \cdot 75^2}{8} = 77484,4 \text{ гН/см}, \quad (3)$$

где  $q$  – распределенная нагрузка на единицу ширины консоли;  $l$  – ширина консоли.

Требуемый момент сопротивления трубы центрирующего амортизатора:

$$W_x = \frac{M}{R} = \frac{77484,4}{230} = 336,9 \text{ см}^3, \quad (4)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $R$  – расчетное сопротивление стали на изгиб.

Принимаем овальный профиль 0 32,5×6 мм,  $A = 60,1 \text{ см}^2$ ,  $i_x = 14,6$ ,  $J_x = 12891 \text{ см}^4$ . Фактический момент сопротивления  $W_x = 532,4 \text{ см}^3$ . Проверка прочности амортизатора:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{77484,4}{532,5} = 145,54 < R_y = 0,9 \cdot 230 = 207 \text{ МПа}, \quad (5)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $W_x$  – требуемый момент сопротивления.

Консоли с облойкой работают как единый трубобетонный элемент после полного монтажа конструкции. Такой эффект достигается нагнетанием мелкозернистого расширяющего бетона в полость между колонной и стенкой двутавра. За счет превращения элемента в трубобетонный, отказа от использования сварки (вся конструкция собирается на болтах) увеличивается живучесть конструкции. Такая конструкция как нельзя лучше подходит для усиления симметричных консолей промышленных зданий, т.к. решает не только те проблемы, которые описаны выше (остановка рабочего процесса, материалоемкость и т.д.), но и улучшает работу колонны в целом. Это можно объяснить тем, что усилие от подкрановых балок передается с минимальным эксцентриситетом на нижнюю часть колонны.

Таким образом, по сравнению с типовыми методами усиления способ восстановления несущей способности разрушающихся от воздействия подкрановых балок по среднему ряду колонн железобетонных симметричных консолей имеет ряд преимуществ:

1. Несущая способность разрушающейся коррозией бетона и арматуры консоли полностью восстановлена.
2. Овальные в сечении амортизаторы гасят динамику воздействий колес кранов, что повышает выносливость узла крепления подкрановых балок и повышает надежность работы тяжелой.
3. Обеспечено восстановление проектного положения подкрановых балок в процессе эксплуатации.
4. Овальный амортизатор передает опорную реакцию от смежных балок с минимальным эксцентриситетом вблизи центра тяжести сечения нижней части колонны и разгружает разрушающуюся консоль от опорной реакции и изгибающего момента.
5. Рихтовка подкрановых путей, как по вертикали, так и по горизонтали механизирована затяжкой гаек на тяжах гайковертом.
6. Затяжка гаек гайковертом на вертикальных тяжах обеспечивает точную выверку высотных отметок смежных подкрановых балок и закрепленных на них соосно рельсов.
7. Повторное поддомкрачивание подкрановых балок легко осуществляется.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений [Текст] / НИИСК. – М.: Стройиздат, 1989. – 104 с.
2. Способ восстановления несущей способности разрушающихся по среднему ряду колонн железобетонных симметричных консолей [Текст]: №2010154275, заявл. на патент 29.12.10.
3. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст]. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.

### **Нежданов Кирилл Константинович**

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции»  
Тел.: +7 (8412) 44-96-37

### **Жуков Александр Николаевич**

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции»  
Тел.: +7-950-236-27-26  
E-mail: sanekral@yandex.ru

---

NEZH DANOV K.K., ZHUKOV A.N.

## **RESEARCH METHODS OF ONE-STOREY INDUSTRIAL BUILDINGS CANTILEVERS REINFORCEMENT**

*Basic methods of cantilevers concrete columns reinforcement in one-storey industrial buildings are considered in the article. Main advantages and disadvantages of existing methods are described. A*

*new method of restoring the bearing capacity of cantilevers concrete columns reinforcement in one-storey industrial buildings is offered. Developed cantilever reinforcement is done using prefabricated metal cage with an oval profile. Method of reinforcement cage calculation these is presented in the research. Advantages of the new method in comparison with the existing ones are mentioned.*

**Keywords:** *research, reinforcement methods, cantilever, one-storey industrial buildings.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Rekomendacii po ocenke sostojanija i usileniju stroitel'nyh konstrukcij promyslennyh zdaniy i sooruzhenij [Tekst] / NIISK. – M.: Strojizdat, 1989. – 104 c.
2. Sposob vosstanovlenija nesuwej sposobnosti razrushajuwihsja po srednemu rjadu kolonn zhelezobe-tonnyh simmetrichnyh konsol'ej [Tekst]: №2010154275, zajavl. na patent 29.12.10.
3. SNiP II-23-81\*. Stal'nye konstrukcii [Tekst]. – M.: FGUP CPP, 2005. – 90 s.

### **Nezhdanov Cyrill Konstantinovich**

Penza state university of architecture and building, Penza  
Doctor of technical science, professor of department «Building designs»  
Ph.: +7(8412) 44-96-37

### **Zhukov Alexander Nikolaevich**

Penza state university of architecture and building, Penza  
Post-graduate student of department «Building designs»  
Ph.: +7 950 236 27 26  
E-mail: sanekral@yandex.ru

ТУРКОВ А.В., ГВОЗКОВ П.А.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СЛОЯ СОСТАВНОЙ БАЛКИ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОНСТРУКЦИИ

*Рассматриваются составные двухслойные балки с различными модулями упругости слоев. Материал одного слоя – древесина, второго слоя – сталь; деревянный слой представлен бруском сечением 40×40 мм, стальной выполнен из квадратной трубы сечением 40×40×2 мм. Условия закрепления обоих слоев – шарниры. Для определения модуля упругости древесины применен вибрационный метод. На основе вибрационного метода исследования выявлена возможность определения модуля упругости материала слоя составной балки при условии, что слои соединены бесконечно жесткими поперечными связями и связями сдвига, а модуль упругости второго слоя известен.*

**Ключевые слова:** модуль упругости, составная балка, поперечные связи, связи сдвига, частота собственных колебаний.

Реконструкция зданий и сооружений в отдельных случаях предполагает усиление деревянных балок подращиванием или наращиванием дополнительного слоя, причем не всегда деревянными элементами. Часто в качестве усиливающего слоя используется стальной элемент, жестко соединенный с усиливаемым слоем. В результате получается составная балка, слои которой составлены из разномодульных материалов, работающих совместно.

В этом случае возникает задача определения физико-механических характеристик материалов несущих конструкций, в частности, модуля упругости для оценки деформативных характеристик балки. Причем, если для стальных конструкций модуль упругости практически не изменяется для различных марок углеродистых и низколегированных сталей, которые в основном используются в строительных конструкциях зданий и сооружений, то для такого материала как древесина, значение модуля упругости может колебаться в достаточно широких пределах, так как модуль упругости древесины в значительной мере зависит от влажности, количества и качества пороков по длине балки.

Метод определения статического кратковременного модуля упругости древесины приведен в стандарте [1]. При этом испытания проводятся на чистых образцах стандартной влажности в лабораторных условиях. В условиях эксплуатации деревянной балки проведение таких стандартных испытаний часто затруднительно, так как выпиливание из конструкции проб для изготовления образцов не всегда возможно из условия прочности находящейся под нагрузкой балки, а выпиливание проб чистой без пороков древесины иногда просто невозможно. Кроме того, при проведении прочностных расчетов важно знать реальный модуль упругости древесины с учетом ее пороков. Для составной дерево-металлической балки предлагается оценивать модуль упругости древесины слоя вибрационным методом, предполагая, что деформационные характеристики стального слоя известны. Таким образом, **целью** настоящего исследования является определение модуля упругости древесины в составной дерево-металлической балке на основе вибрационных технологий.

Для исследований численными методами принята составная дерево-металлическая балка пролетом 2,9 м (рисунок 1). Опирающие оба слоя шарнирные, жесткость поперечных связей и связей сдвига бесконечно большая, что в реальных конструкциях соответствует клеевому шву между слоями. Деревянный слой выполнен из бруска сечением 40×40 мм, стальной слой – из квадратной трубы 40×40 мм с толщиной стенки 2 мм.

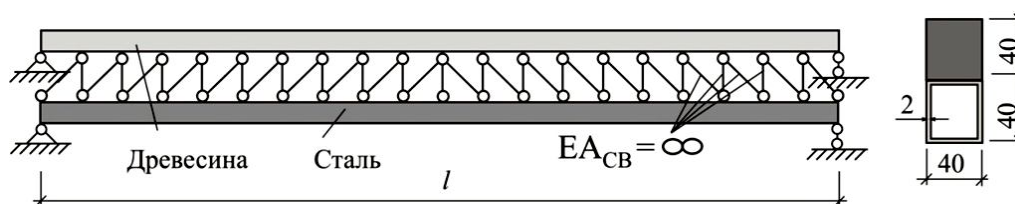


Рисунок 1 – Расчетная схема и сечение составной дерево-металлической балки

Таблица 1

Модуль упругости $E$ (МПа)	Круговая частота основного тона $\omega$ ( $c^{-1}$ )
0	306,4844
0,05	306,4845
0,1	306,4845
0,5	306,4845
1	306,4850
5	306,4863
10	306,4882
50	306,5028
$10^2$	306,5210
$5 \times 10^2$	306,6671
$10^3$	306,8497
$5 \times 10^3$	308,3049
$10^4$	310,1104
$5 \times 10^4$	333,4331
$10^5$	340,453
$5 \times 10^5$	443,5233
$10^6$	534,4646

Каждый слой разбит на 20 конечных элементов; в узлах конечных элементов слоев расположены узлы поперечных связей и связей ига. Сдвига. В узлы слоев прикладывались массы от их собственного веса в зависимости от длины конечного элемента.

В процессе исследования вычислялись частоты собственных поперечных колебаний составной балки в зависимости от модуля упругости деревянного слоя, при этом жесткость стального слоя и связей между слоями оставалась постоянной. Изгибная жесткость стального слоя  $EI_{ст}$  принималась как произведение момента инерции сечения трубы на модуль упругости стали  $E = 2,06 \times 10^5$  МПа. Для деревянного слоя момент инерции сечения  $I_d$  оставался постоянным, а изменялся модуль упругости материала  $E_d$ . Результаты исследований приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

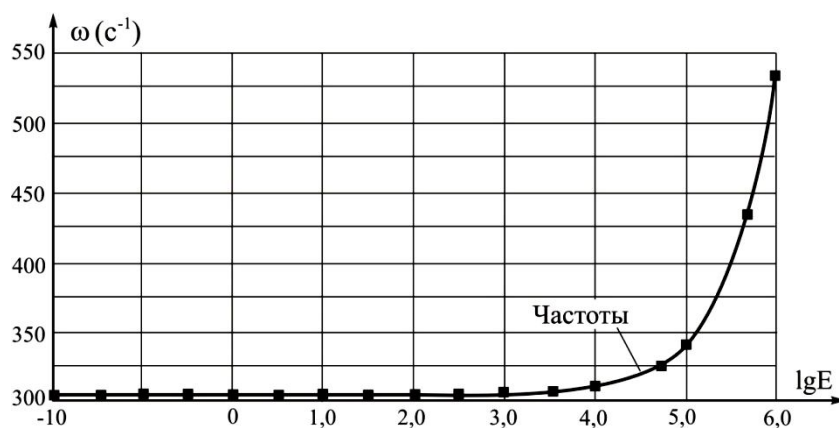


Рисунок 2 – Зависимость частот собственных колебаний составной балки от модуля упругости деревянного слоя

Как видно из графика рисунка 2, частоты колебаний очень незначительно изменяются до модуля упругости примерно  $10^3$  МПа, после чего резко возрастают. Пользуясь данным графиком, по частоте собственных колебаний составной балки можно определить фактический модуль упругости материала слоя с учетом пороков древесины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16483.9-73. Древесина. Метод определения модуля упругости при статическом изгибе [Текст]. – Переиздание (сентябрь 1999 г.) с Изменениями №1, 2, утвержденными в январе 1980 г., октябре 1988 г. (ИУС 3-80, 1-89). – М.: Госстандарт РФ, 1990. – 7 с.

**Турков Андрей Викторович**

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

**Гвозков Павел Александрович**

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура»  
Тел.: 8 (4862) 73-43-66  
E-mail: naukaorel@mail.ru

---

**TURKOV A.V., GVOZKOV P.A.**

### **DEFINITION OF THE MODULE OF ELASTICITY OF THE LAYER OF THE COMPOUND BEAM ON DESIGN DYNAMIC CHARACTERISTICS**

*This paper reports the analysis of composite two-layer girder with plies of different modulus of elasticity. Material of one ply – wood, the second ply – steel; a wooden ply is presented by a blocking lumber with the section of 40 x 40 mm, a steel layer is made of a square pipe with the section of 40 x 40 x 2 mm. Joints are means of two layers mount. To define modulus of wood elasticity there was used a vibrating method. On the basis of a vibrating research method there was revealed a possibility of defining modulus of elasticity for a material layer in a composite girder provided that the layers are connected by infinitely rigid cross-ties and ties of shift, and modulus of elasticity for the second layer is known.*

**Keywords:** *the elasticity module, a compound beam, cross-section communications, shift communications, frequency of own fluctuations.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. GOST 16483.9-73. Drevesina. Metod opredelenija modulja uprugosti pri staticheskom izgibe [Tekst]. – Pe-reizdanie (sentjabr' 1999 g.) s Izmenenijami №1, 2, utverzhdennymi v janvare 1980 g., oktjabre 1988 g. (IUS 3-80, 1-89). – M.: Gosstandart RF, 1990. – 7 s.

**Turkov Andrey Viktorovich**

State university ESPC, Orel  
Doctor of technical science, professor of department «Building designs and materials»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-95  
E-mail: antur@orel.ru

**Gvozkov Pavel Aleksandrovich**

State university ESPC, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department «Architecture»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-66  
E-mail: naukaorel@mail.ru

УДК 711.55/57(470.23)

КАЛИНКИНА Н.А.

**ЗОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ САМАРЫ С ЦЕЛЬЮ  
РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СРЕДНЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (СПО)**

*В статье затронуты вопросы создания оптимальной сети средних профессиональных учебных заведений. Для зонирования территории был выявлен ряд факторов как градостроительных, так и социально-экономических, влияющих на размещение объектов СПО. В результате их комплексного анализа, а также с учетом перспективного развития города, Самара была разделена на три крупные зоны, в структуре которых выделены по три подзоны. Для зон и подзон даны характеристики и рекомендации по оптимизации и особенностям размещения в них средних профессиональных учебных заведений в зависимости от вместимости и набора образовательных специализаций.*

**Ключевые слова:** учреждения среднего профессионального образования, учебные комплексы, градостроительное зонирование.

Средние профессиональные учебные заведения относят к учреждениям общегородского, районного и областного значения. В связи с обучением молодежи старше 15 лет, радиус их обслуживания не ограничен. Рациональная организация и направления формирования сети средних профессиональных учебных заведений в свою очередь зависят от общих социально-экономических предпосылок: демографической ситуации, влияющей на численность обучающихся, их перспективного количества, определяемого экономическими потребностями региона, его специализацией и развитием социокультурных отраслей. Статистика отмечает, что прием в учебные заведения внутри одной области зависит от их транспортной доступности, наличия общежитий и т.д. Развитие сети размещения СПО необходимо прогнозировать с учетом разумного решения сочетания «учеба – жилище – места приложения труда».

Для зонирования территории был выделен ряд факторов, влияющих на размещение учреждений среднего профессионального образования, таких как плотность населения и плотность жилого фонда; транспортная инфраструктура; плотность размещения учреждений общественного назначения (для учреждений гуманитарного профиля и со специализацией в сфере обслуживания); промышленные предприятия в структуре города (для учебных заведений технических специальностей); существующая сеть средних профессиональных учебных заведений и планируемые территории для их строительства.

Важную роль при размещении профессионального учебного комплекса играет его специализация (профиль заведения), которая определяет возможность допустимого либо нежелательного соседства их с другими типами зданий. Кроме того, непосредственное влияние на выбор места для комплекса СПО в структуре города оказывает его вместимость. С учетом этого были определены четыре градации вместимости средних профессиональных учебных заведений: до пяти учебных групп – *особо малой вместимости* (центры повышения квалификации); 6-15 групп – *малой*; 16-40 – *средней* и свыше 41 группы – *большой вместимости*.

При зонировании города градостроительный анализ опирался на ранее сформулированную самарскими исследователями «концепцию пространственного развития города Самары» [2], а также «Положения о территориальном планировании» [1]. В рамках формирования Концепции генерального плана города было принято членение городской территории на 168 «учетных территориальных единиц» [2], в которых проводилась пофакторная оценка.



На основе проведенного анализа факторов были составлены градостроительные схемы, в результате которых в городской структуре выделены три крупные зоны: зона I, зона II, зона III; а также три подзоны: «А», «Б», «В» (рисунок 1).

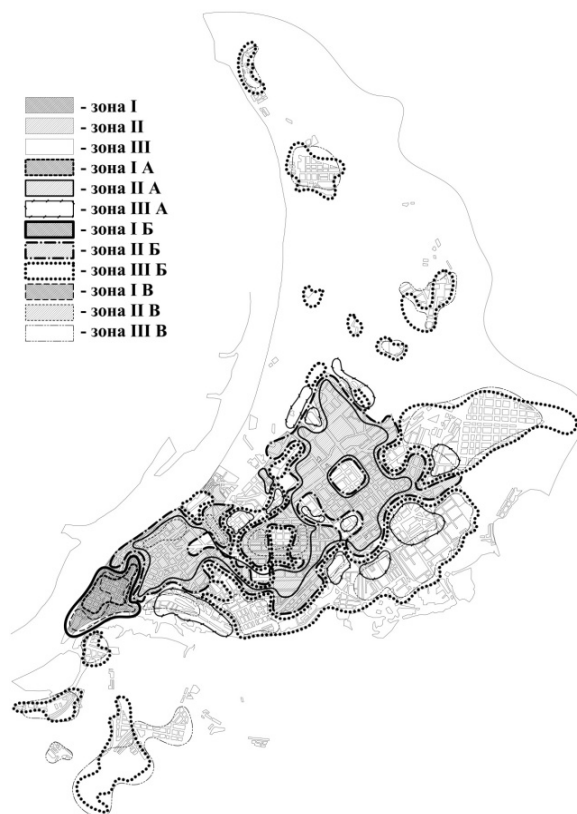


Рисунок 1 – Схема зонирования г. Самары для размещения в его структуре объектов среднего профессионального образования

**Зона I** – это территория города с большой плотностью застройки и населения, имеющая хорошую транспортную доступность. В данной зоне можно отметить высокую, местами среднюю плотность размещения средних профессиональных учебных заведений. Данная зона представлена кварталами «Старого города».

**Зона II** – формируется из районов города со средней плотностью застройки, большой или средней плотностью населения и так же хорошей, а местами и высокой степенью транспортной доступности. На данных территориях наблюдается средняя или низкая обеспеченность учреждениями СПО.

**Зона III** – зоны города с низкой плотностью застройки и плотностью населения, средней и низкой доступностью мест для городского общественного транспорта, в основном, низкой плотностью размещения средних профессиональных учебных заведений.

В каждой из трех зон были выделены подзоны – это районы, в которых рекомендовано размещение объектов СПО определенных специализаций.

**Подзона «А»** – для этих районов характерна концентрация объектов культурно-бытового обслуживания, соответственно, они создают условия для размещения образовательных учреждений гуманитарного профиля, а также ориентированных на подготовку учащихся со специализацией в сфере обслуживания.

На размещение в структуре города средних профессиональных учебных заведений по профилю «экономика и управление», влияние окажет концентрация офисов административных и государственных организаций, офисов фирм и предприятий, финансово-кредитных организаций, юридических и нотариальных контор. Именно они формируют **подзону «Б»**, рекомендуемую для размещения в ней учреждений среднего профессионального образования данной специализации.

Размещение объектов соответствующих специализаций в подзонах «А» и «Б» позволит не только приблизить «рабочие места» к зоне подготовки учащихся, но и организовать удобную и квалифицированную систему переподготовки, дополнительного образования и повышения квалификации специалистов данных отраслей.

**Подзона «В»** – это район для размещения средних профессиональных учебных заведений технических специальностей. Формирование данной подзоны происходит на основе структуры размещения промышленных производств на селитебных пригородных территориях города. Целесообразность приближения учебного заведения к промышленности определяется уровнем вредности производства и видом обучения. Исходя из этого возможно появление профильных учреждений СПО в допустимой близости, либо нахождение их в самой структуре сложившихся промышленных зон в виде отраслевых и фирменных центров подготовки и переподготовки работников без возрастного ограничения. Поскольку предприятия в данном исследовании рассматриваются как потенциальные «заказчики на выпускников-специалистов» учебного заведения, то появляется возможность рассматривать их как базу, представленную специализированными профильными мастерскими.

Рассматривая подробнее возможности размещения объектов СПО в различных зонах города, можно отметить, что в «исторической» части города возможно размещение средних профессиональных учебных заведений всех специализаций. Поскольку, данная территория относится к зоне I, то в связи с ограниченностью свободных территорий в ней возможно нахождение учреждений только малой вместимости. Профессиональные учреждения технической специализации нецелесообразно делать вместимостью менее 720 учащихся, поскольку площади мастерских в данном случае будут использоваться неэффективно, поэтому в случае необходимости в данной зоне возможно размещение блока для теоретических занятий, а учебно-производственные помещения будут вынесены отдельно, что позволит снизить необходимые для размещения площади, но создаст некоторые трудности в функционировании объекта.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что на территории **зоны I** возможно размещение учебных заведений гуманитарного профиля, а также со специализацией в сфере обслуживания и блоков для теоретических занятий комплексов технических направлений обучения малой вместимости.

В **зонах II, IIА, IIБ и IIIА, IIIБ** рекомендуется размещение учреждений СПО средней вместимости, поскольку достаточно плотная застройка не позволяет разместить очень крупный объект, да и с точки зрения протекания учебного процесса несколько учебных заведений средней вместимости функционируют эффективнее одного очень крупного учреждения.

В зоне **IIВ** рекомендуется проектировать средние профессиональные учебные заведения технических специальностей средней вместимости. Направления обучения желательно выбирать из условий необходимости их для предприятий, находящихся в данной зоне.

**Зона III, IIIВ** позволит разместить крупные учебные заведения технического профиля и большой вместимости с максимальным набором помещений в различных блоках. Плотность территорий данной зоны достаточно мала, что в наименьшей степени ограничивает функционально-композиционное и объемно-планировочное решения СПУЗ.

Как видно на рисунке 1, подзоны не локализируются внутри зоны, они «накладываются» друг на друга, взаимодействуют, представляя в целом вариантность развития территории, а также набора и модернизации специализаций учебных заведений среднего профессионального образования. Сложившаяся структура набора (в одном учебном заведении происходит обучение и техническим, и гуманитарным специальностям) вполне оправдана, поэтому в подзоне В, рекомендуемые к размещению учебные заведения технического профиля целесообразно дополнять отделениями иных специализаций в зависимости от нахождения данного блока в структуре города и соседства с другими подзонами.

Таким образом, выполненное зонирование города позволит наиболее эффективно разместить учреждения среднего профессионального образования в его структуре, подобрав оптимальный набор образовательных специализаций, вместимость и функциональный состав учебных заведений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пояснительная записка к генеральному плану. URL: [http:// city.samara.ru /sites/default/files/ document\\_file / Poyasnitel'naya\\_zapiska\\_.doc](http://city.samara.ru/sites/default/files/document_file/Poyasnitel'naya_zapiska_.doc) (обращение 19.02.2011 г.)
2. Ребайн, Т.Я., Концепция пространственного развития города Самары [Текст] / Т.Я. Ребайн, Ю.М. Корякин, С.Ф. Васильчикова. – Самара, 2006. – 114 с.

**Калинкина Надежда Александровна**

Самарский государственный архитектурно-строительный университет, г. Самара

Ассистент кафедры «Архитектура жилых и общественных зданий»

Тел.: +7 (846) 265-01-88, +7 904 749 20 00

E-mail: nad\_si@mail.ru

---

KALINKINA N.A.

**SAMARA REGION ZONING FOR ALLOCATION OF SECONDARY VOCATIONAL TRAINING INSTITUTIONS**

*The article touched on the creation of an optimal network of secondary vocational schools. For zoning identified a number of factors such as urban development and socio-economic, impact on accommodation facilities of secondary vocational education. As a result of complex analysis, as well as the future development of the city, Samara was divided into three major zones in the structure of which are marked by three subzones. For zones and subzones are given characteristics and recommendations for optimizing the placement and characteristics of these secondary vocational schools, depending on capacity and a set of educational majors.*

**Keywords:** secondary vocational education institutions, training centers, urban zoning.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Poyasnitel'naja zapiska k general'nomu planu. URL: [http:// city.samara.ru /sites/default/files/ document\\_file / Poyasnitel'naya\\_zapiska\\_.doc](http://city.samara.ru/sites/default/files/document_file/Poyasnitel'naya_zapiska_.doc) (obrawenie 19.02.2011 g.)
2. Rebajn, T.Ja., Konceptija prostranstvennogo razvitija goroda Samary [Tekst] / T.Ja. Rebajn, Ju.M. Korjakin, S.F. Vasil'chikova. – Samara, 2006. – 114 s.

**Kalinkina Nadezhda Aleksandrovna**

Samara state architecturally-building university, Samara

Assistant to department «Architecture of inhabited and public buildings»

Ph.: +7 (846) 265-01-88, +7 904 749 20 00

E-mail: nad\_si@mail.ru

УДК 621.315.616.97

АКЧУРИН Т.К., ПУШКАРСКАЯ А.А.

## **ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО КОНТАКТА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ КОНСТРУКЦИЙ**

*Авторами статьи предлагается полимерная композиция для химической гидроизоляции, основной компонент которой является полимерным отходом. Эффект водонепроницаемости обеспечивается за счет ряда строго последовательных химических реакций между компонентами полимерной композиции, продолжающихся во времени, а также процессов смачивания и адгезии проходящих внутри структуры защищаемого материала, в результате чего заполняются капилляры. Структура пленкообразования композиции обуславливает высокие гидроизоляционные свойства состава.*

**Ключевые слова:** полимерная композиция, гидроизоляция конструкций, структура.

Современный рынок строительных материалов предлагает большой ассортимент полимерных гидроизоляционных материалов, в основном импортных, которые в 3-4 раза дороже отечественных. Разработка новых полимерных композиций для гидроизоляции на основе техногенных отходов является актуальной задачей, что оправдано с экономической и экологической точки зрения.

Авторами статьи предлагается полимерная композиция для химической гидроизоляции. Основной компонент композита (А) является полимерным отходом – рекуперат эпоксидной смолы. Композиция состоит: пленкообразующая матрица на основе полимерных отходов (А), модификатор (В), для придания эластичности композиции, отвердитель (С), наполнитель (D), вводится в целях экономии компонентов композиции и получения необходимой вязкости покрытия при нанесении на вертикальную поверхность, пигмент. Все компоненты композиции являются порошкообразными материалами и смешиваются в сухом виде. В качестве отвердителя использовали полиамин [2-3]. При проведении эксперимента полимерное покрытие наносили в виде раствора.

Прочность полимерных пленок определяется свойством смачивания, т.е. условием формирования площади контакта жидкий адгезив – подложка, образованием внутренних напряжений и релаксационными процессами при затвердевании адгезива, а также влиянием внешних условий (давления, температуры, и др.). Прочность клеевых соединений, кроме того, определяется когезией отвердевшей клеевой прослойки [1-4].

Поверхностное натяжение  $\sigma_{ПК}$  раствора полимерной композиции определено экспериментально и равно 41,58 мДж/м<sup>2</sup>, величина краевого угла смачивания  $\theta < 90^\circ$ . В соответствии с уравнением Дюпре-Юнга (1) равновесный краевой угол  $\theta$  можно определить через работу адгезии:

$$\cos \theta = \frac{W_A - \sigma_{ПК}}{\sigma_{ПК}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) связывает работу адгезии  $W_a$  с краевым углом и позволяет рассчитать  $W_a$ , если известны поверхностная энергия жидкости и краевой угол. Работу адгезии можно также выразить через среднюю энергию  $U_{12}$  взаимодействия приповерхностных молекул веществ 1 и 2 (адгезив – подложка):

$$w_{12} = \frac{U_{12}}{\pi \cdot r_2^2}. \quad (2)$$

Расчет этой энергии представляет собой центральную проблему при исследовании адгезионных свойств веществ, при определении характера сил взаимодействия между жидкостью и твердым телом [2-3]. Протекающие на границе раздела фаз физические явления, связанные с микропараметрами системы, описывающими парное взаимодействие молекул, показывают, что измерение краевого угла смачивания можно рассматривать в качестве мощного метода исследования адгезионных свойств композиции и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз. Адекватность теоретического предложения проверена в ходе экспериментов, в которых краевой угол смачивания измеряется либо непосредственно, либо по результатам исследования капиллярных явлений.

Полученные в работе сравнительно небольшие значения показателя поверхностного натяжения характерны для молекулярных сил взаимодействия между поверхностью и полимерным покрытием. Следовательно, смачивание подложки полимерной композицией будет обеспечено межмолекулярным взаимодействием на границе раздела.

Необходимое и достаточное условие смачивания в этом случае заключается в том, чтобы поверхностное натяжение жидкости было меньше работы адгезии. Чем ниже поверхностное натяжение жидкости, тем легче выполняется это условие [5-6].

Проведенные исследования показали, что глубина пропитки разработанным составом модифицированной композиции на основе полимерных отходов не более 10 мм, однако прочность пропитанных образцов возрастает в 1,5 раза. Водопоглощение бетонных образцов снижается на порядок, пористость бетона уменьшается в 6,5 раз, прочность увеличивается на 20%, приобретаются также защитные свойства к агрессивному воздействию кислот, растворов солей и нефтепродуктов (рисунок 1, а-г).

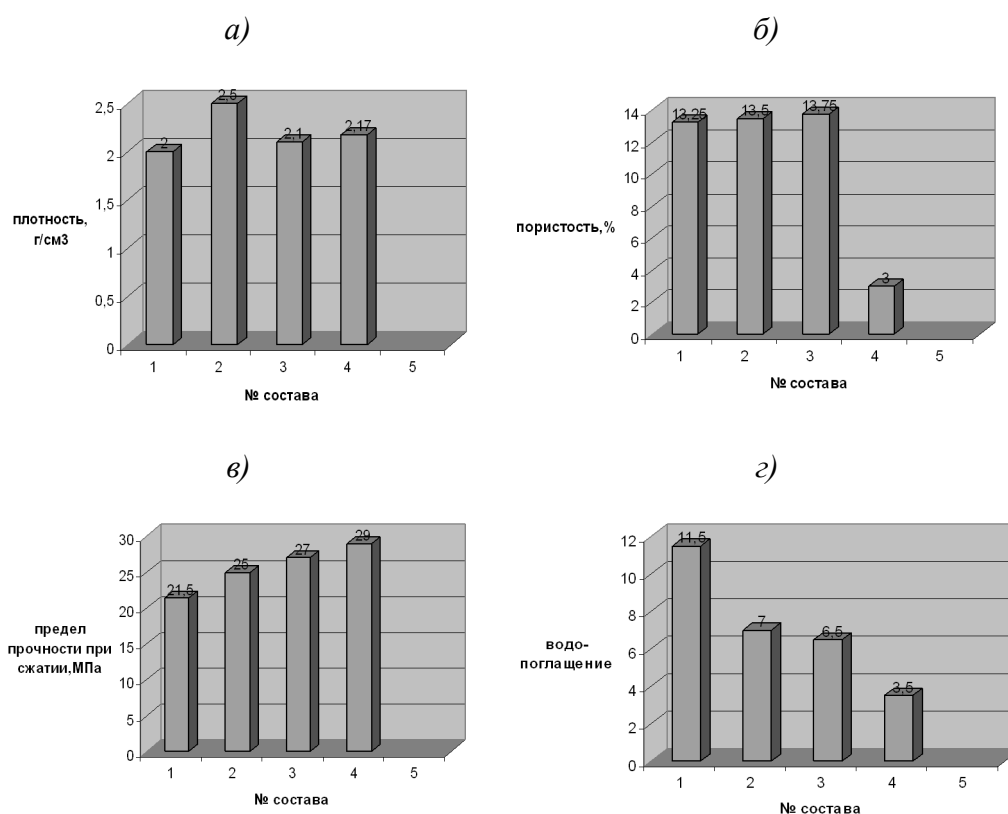
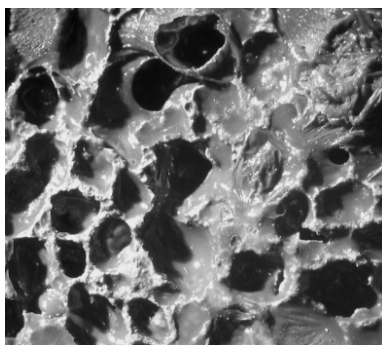


Рисунок 1 – Изменение физико-механических характеристик образцов с полимерным покрытием в зависимости от состава композиции

Эффект водонепроницаемости обеспечивается за счет ряда строго последовательных химических реакций между компонентами полимерной композиции, продолжающихся во времени, а также процессов смачивания и адгезии, проходящих внутри структуры защищаемого материала, в результате чего заполняются капилляры, поры и микротрещины поверхно-

сти. Структура пленкообразования композиции обуславливает высокие гидроизоляционные свойства состава, а также обеспечивает эффект «самозалечивания» путем блокирования пор и трещин в слое конструкции, прилегающем к изолирующему покрытию (рисунок 2).



*Рисунок 2 – Поверхность образца поризованного бетона с полимерным покрытием*

Концентрация раствора определяет толщину одного слоя, но она не является определяющим фактором для покрытия в целом. Покрытие из нескольких слоев с малым содержанием основы дает лучшие адгезионные характеристики, чем покрытие одним слоем с большим содержанием основы, в частности, вследствие того, что многослойные покрытия дают возможность растворителю легко испаряться и уменьшают возможность отслаивания покрытия от поверхности покрываемого изделия [5-6].

Новый разработанный состав полимерной композиции можно отнести к полимерным мастикам холодного отверждения, в процессе проведения строительных работ не требующий предварительного разогрева компаунда. Наполнителем может служить любой материал минерального состава, техногенного характера. Для улучшения прочностных характеристик мастичных кровель их можно армировать стеклохолстом или стеклосеткой. Армирование повышает прочность, но снижает эластичность мастичного слоя. Поэтому его можно выполнять лишь в отдельных узлах (обычно в примыканиях и сопряжениях) [6]. К преимуществам разработанной мастичной гидроизоляции можно отнести отсутствие мест стыков и швов, например, в кровельном ковре. Недостаток мастичного слоя из разработанной полимерной композиции состоит в том, что трудно добиться гарантированной толщины изолирующей пленки, особенно при больших уклонах и неровных поверхностях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сони́на, Н.М. Композиционные строительные материалы для гидроизоляции наземных сооружений [Текст] / Н.М. Сони́на, В.Г. Павлова // Строительные материалы. – 1986. – №8. – С. 11-15.
2. Горюнов, Ю.В. Смачивание [Текст] / Ю.В. Горюнов, Б.Д. Сумм. – М.: Знание, 1972. – 54 с.
3. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание [Текст] / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 413 с.
4. Соголова, Т.И. О регулировании механических свойств полимеров изменением их надмолекулярной структуры [Текст] / Т.И. Соголова // Механика полимеров. – 1966. – №5. – С. 21-23.
5. Атрощенко, Э.С. Разработка научных основ формирования структуры и свойств композиционных материалов [Текст] / Э.С. Атрощенко, А.Е. Розин // Материаловедение. – 1998. – №6. – С. 26-30.

### **Акчу́рин Талга́ть Кади́мович**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград  
Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и строительные технологии»  
Тел.: +7 (8442) 96-99-56

### **Пушка́рская Анна Андре́евна**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград  
Аспирант кафедры «Строительные материалы и специальные технологии»  
Тел.: +7 (8443) 58-14-07  
E-mail: opushkarskaya@mail.ru

AKCHURIN T.K., PUSHKARSKAYA A.A.

## INTERPHASE FORMATION CONTACT POLYMER COMPOSITIONS FOR CHEMICAL WATERPROOFING OF STRUCTURES

*Authors of article offer a polymeric composition for a chemical waterproofing, basis of which component is a polymeric withdrawal. The effect of water resistance is provided at the expense of a number of strictly consecutive chemical reactions between components of the polymeric composition, proceeding in time, and also processes of wetting and adhesion passing in structure of a protected material therefore capillaries are filled. The structure film-forming compositions causes high waterproofing properties of structure.*

**Keywords:** *Polymeric composition, waterproofing of designs, structure.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Sonina, N.M. Kompozicionnye stroitel'nye materialy dlja gidroizoljicii nazemnyh sooruzhenij [Tekst] / N.M. Sonina, V.G. Pavlova // Stroitel'nye materialy. – 1986. – №8. – S. 11-15.
2. Gorjunov, Ju.V. Smachivanie [Tekst] / Ju.V. Gorjunov, B.D. Summ. – M.: Znanie, 1972. – 54 s.
3. Zimon, A.D. Adgezija zhidkosti i smachivanie [Tekst] / A.D. Zimon. – M.: Himija, 1974. – 413 s.
4. Sogolova, T.I. O regulirovanii mehanicheskikh svojstv polimerov izmeneniem ih nadmolekuljarnoj struktury [Tekst] / T.I. Sogolova // Mehanika polimerov. – 1966. – №5. – S. 21-23.
5. Atrowenko, Je.S. Razrabotka nauchnyh osnov formirovanija struktury i svojstv kompozicionnyh materialov [Tekst] / Je.S. Atrowenko, A.E. Rozin // Materialovedenie. – 1998. – №6. – S. 26-30.

#### **Akchurin Talgat Kadimovich**

Volgograd state architecturally-building university, Volgograd

Candidate of technical science, professor, head of department «Building materials and building technologies»

Ph.: +7(8442) 96-99-56

#### **Pushkarskaya Anna Andreevna**

The Volgograd state architecturally-building university, Volgograd

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

Ph.: +7(8443) 58-14-07

E-mail: opushkarskaya@mail.ru

ГОТОВЦЕВ В.М., ПРИДАТКО Ю.М.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖФАЗНЫХ СЛОЕВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

*Для описания состояния жидкости в межфазных слоях композита использован классический подход Ван-дер-Ваальса. Показано, что изотерма Ван-дер-Ваальса позволяет оценить состояние вещества в межфазном слое. Обоснована рабочая расчетная схема для описания поверхностных явлений. Получены выражения для оценки параметров межфазного слоя.*

**Ключевые слова:** межфазный слой, композиционный материал.

Структура композиционного материала во многом определяется поверхностными явлениями при взаимодействии его фаз. Такие явления обусловлены особыми свойствами тонких слоев вещества на границе их соприкосновения. При этом на межфазных границах вследствие различного состава и строения соприкасающихся фаз проявляется резкая анизотропия свойств вещества, приводящая к возникновению градиентных полей параметров состояния среды. Описание закономерностей поверхностных явлений служит теоретической основой формирования материалов с заданными свойствами: бетонов, керамики, цементов, ситаллов, сорбентов, катализаторов, лекарственных средств и т.п. [1]. Однако современные представления не позволяют объяснить механизм таких явлений [2-4].

Для описания состояния жидкости в межфазном слое использовано уравнение Ван-дер-Ваальса, позволяющее определить силы межмолекулярного притяжения и отталкивания в жидкости. Его общий вид:

$$P + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V-b}. \quad (1)$$

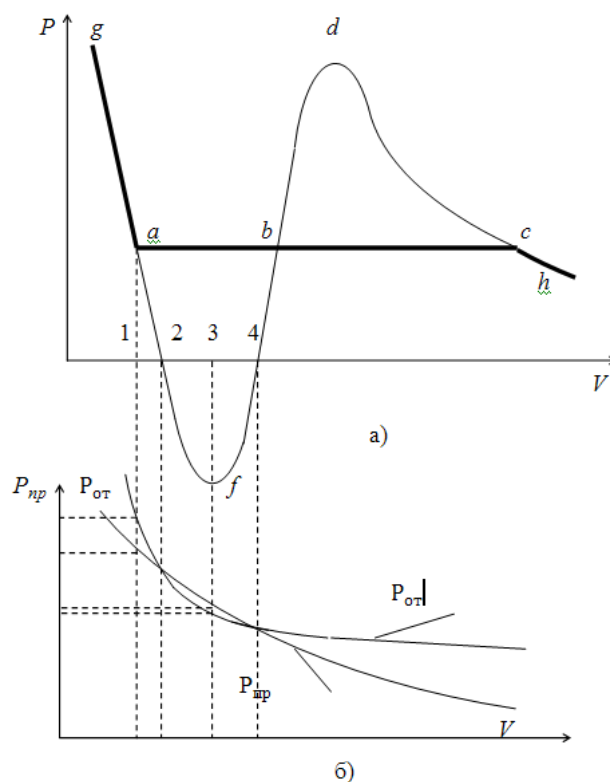
В этом выражении  $P$  – внешнее давление;  $T$  – температура в градусах Кельвина;  $V$  – удельный молярный объем среды, т.е. объем, занимаемый одним молем вещества при заданных температуре и давлении;  $b$  – поправка на объем молекул среды;  $R$  – газовая постоянная;  $a$  – константа, учитывающая взаимное притяжение молекул вещества.

Правая часть уравнения (1) определяет значение сил отталкивания в жидкости под действием внешнего давления  $P$ . Второе слагаемое в левой части позволяет оценить силы притяжения [5]. Характерный вид изотермы Ван-дер-Ваальса для воды при температуре 293 К [6] представлен на рисунке 1. Отметим, что она расположена как в области положительных, так и отрицательных значений  $P$ . Между изотермой Ван-дер-Ваальса ( $gafbdch$ ) и опытной изотермой ( $gabch$ ) имеется существенное различие [5]. Жирной линией показаны участки изотермы, согласующиеся с экспериментом. При положительных значениях  $P$  давление, определяемое силами отталкивания  $P_{от}$ , больше давления, определяемого силами притяжения  $P_{пр}$ , то есть  $P_{от} > P_{пр}$  и наоборот. Для значений удельных объемов  $V_2$  и  $V_4$  внешнее давление  $P$  равно нулю.

Участки  $ch$  и  $ga$  изотермы Ван-дер-Ваальса совпадают (по крайней мере качественно) с соответствующими участками опытной изотермы. Участок  $ch$  соответствует газообразному состоянию, а участок  $ga$  – жидкости. Во всяком случае, из уравнения Ван-дер-Ваальса, результатов опытов очевидно существование двух фаз вещества. Однако из рассмотрения его состояния на участке кривой  $fbd$  следует возможность существования фазы, для которой имеет место необычная зависимость объема от давления: с увеличением давления объем не уменьшается, а растет. Ранее на возможность ее существования как следствие из теории Ван-дер-Ваальса не указывалось. Считается, что в природе не могут существовать такие веществ-



ва, для которых рост давления приводил бы к увеличению объема. Состояние вещества с такими свойствами неизбежно должно быть крайне неустойчивым [5].



**Рисунок 1 – Характерный вид изотермы Ван-дер-Ваальса: а – общий вид изотермы Ван-дер-Ваальса; б – зависимости давлений притяжения и отталкивания  $P_{пр}$  и  $P_{от}$  от молярного объема  $V$**

Для решения задачи описания состояния жидкости в межфазном слое проанализируем уравнение (1). Оценим возможность изменения внешнего давления  $P$  по толщине межфазного слоя. С учетом его малой толщины (молекулярного масштаба) такая возможность практически отсутствует. Это означает, что слагаемые в правой части уравнения должны быть равны по модулю, что отвечает точке 2 на изотерме Ван-дер-Ваальса (рисунок 1). С другой стороны, параметры состояния жидкости изменяются по толщине межфазного слоя, что означает соответствие не одной точке 2 изотермы, а целому ее участку с множеством состояний.

Сказанное выше позволяет сделать вывод о том, что в условиях межфазного слоя реализуется ситуация аналогичная внесению в среду некоторого внешнего воздействия  $P$ . Рассмотрим принятую в литературе трактовку сил притяжения Ван-дер-Ваальса в жидкости. «Любая молекула, находящаяся вблизи стенки сосуда, где она, с одной стороны, имеет больше «соседей», чем с другой, испытывает результирующую силу со стороны остальных молекул, и сила эта направлена внутрь среды. Благодаря этому давление на стенку сосуда станет меньше на некоторую величину  $\Delta P$ , так что для давления получим выражение:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \Delta P \text{ или } P + \Delta P = \frac{RT}{v-b}. \quad (2)$$

Силы притяжения между молекулами стремятся сблизить их между собой. Но таким же образом действует и внешнее давление  $P$ » [5].

Таким образом, в самой трактовке сил притяжения между молекулами жидкости присутствует возмущающее воздействие стенки ограничительного сосуда, аналогичное внешнему воздействию  $P$ . Рассмотрим участок  $gf$  изотермы Ван-дер-Ваальса. Как отмечалось ранее, этот участок соответствует состоянию среды в виде жидкости. В точке 2 изотермы Ван-дер-Ваальса возмущающее воздействие стенки ограничительного сосуда становится равным нулю. В точке  $f$  это воздействие достигает максимального значения.

Аналогично в межфазном слое твердое-жидкость происходит изменение параметров состояния жидкости вследствие возмущения, вносимого твердой разделительной поверхностью. На расстояниях от разделительной поверхности, превышающих радиус дальнего действия  $r$  молекулярных сил притяжения, возмущение жидкости поверхностью отсутствует. Будем называть такую среду в соответствии с принятой терминологией «объемной фазой». На границе жидкости и твердой поверхности значение возмущения максимально. Таким образом, состояниям среды в межфазном слое отвечает участок  $2f$  изотермы Ван-дер-Ваальса. При этом точка  $2$  изотермы соответствует состоянию среды на границе межфазного слоя и объемной фазы жидкости, а точка  $f$  имеет параметры состояния среды на границе раздела твердой и жидкой фаз.

С учетом указанного появляется возможность моделирования состояний среды в межфазном слое. Для этого воспользуемся аппаратом механики сплошной среды с введением некоторых допущений. Первое состоит в пренебрежении молекулярным движением. Подразумевается, что в состоянии равновесия молекулы покоятся в положениях минимальной потенциальной энергии. Второе допущение называют приближением среднего поля. Его суть в предположении о существовании молекулярного поля, то есть возможности выделения элемента жидкости, объем которого мал по сравнению с  $r^3$ , но достаточно велик, чтобы содержать число молекул, позволяющее предположить внутри него равномерное распределение молекул [4].

Отметим различие в природе сил притяжения и отталкивания. В соответствии с современными представлениями, силы притяжения являются дальнедействующими, что позволяет отнести их к классу объемных сил [7]. Они образуют векторное силовое поле, в каждой точке которого приложена сила, значение зависит от массы выделенного объема. Силы отталкивания являются поверхностными силами. Их силовое поле имеет тензорный характер, а радиус действия принимается равным нулю. Значение и направление силы отталкивания зависит не только от положения точки приложения, но и от направления площадки, в которой она действует.

В уравнении Ван-дер-Ваальса различия природы сил притяжения и отталкивания не выражены. Те и другие ассоциируются с поверхностными силами. Однако различия между ними оказываются принципиальными при составлении уравнений равновесия.

При введении понятия ван-дер-ваальсовых сил притяжения отмечалось, что стенка сосуда, ограничивающего объем жидкости, действует на среду аналогично дополнительному внешнему давлению  $P$ . В результате этого при отсутствии реального внешнего давления в среде имеются внутренние давления, которые могут быть равны друг другу по модулю, но могут и отличаться. Рассмотрим более подробно эту ситуацию.

Выделим в жидкой объемной фазе, не подверженной действию поверхностных явлений, шаровой объем среды с радиусом  $r$ , равным радиусу дальнего действия молекулярных сил притяжения жидкости (рисунок 2, в). В этом случае точка является частью объемной фазы жидкости. Сосредоточим массу выделенного объема в одной точке (центре шара) и будем рассматривать равновесие шара, как равновесие его центра под действием ван-дер-ваальсовых сил притяжения и отталкивания. Молекулярные силы, действующие на рассматриваемую точку со стороны молекул, расположенных внутри шара, будут внутренними, не оказывающими влияния на равновесие точки. Молекулы, расположенные вне объема шара, не будут притягиваться к его центру, так как расстояние между центром шара и любой такой молекулой будет больше радиуса  $r$  дальнего действия сил притяжения. Отметим, что  $r$  вводится посредством соотношения [4]:

$$F_{\text{пр}} > 0 \text{ при } r > z > 0, \quad (3)$$

где  $z$  – расстояние между взаимодействующими объектами,  $F_{\text{пр}}$  – сила притяжения. Таким образом, в рассматриваемом случае силы притяжения не будут воздействовать на центр шара. Внешними будут только короткодействующие силы по поверхности шара. В силу центральной симметрии распределения этих сил их результирующее воздействие будет равно нулю.

Картина принципиально меняется, если жидкостной объем расположен в межфазном слое вблизи разделяющей поверхности. Рассмотрим точку, лежащую на границе раздела жидкой и твердой фаз (рисунок 2, а). При таком положении точки половина объема шара состоит из жидкости, а вторая – из твердой фазы. Допустим, взаимодействие молекул твердой фазы и жидкости посредством ван-дер-ваальсовых сил отсутствует. В этом случае на контрольную точку действуют силы притяжения только со стороны молекул, расположенных в жидкости. В результате половина объема шара экранируется твердой поверхностью, что приводит к нарушению равновесия, которое имело место в объемной жидкой фазе.

Экранирование половины объема шара эквивалентно отбрасыванию сил притяжения между его частями. С другой стороны, отбрасывание силы притяжения с механической точки зрения эквивалентно приложению такой же силы, но противоположного направления. Таким образом, равновесие контрольной точки, лежащей на разделительной поверхности можно рассматривать как равновесие полного шара, к центру которого приложена объемная сила, значение которой не равно нулю.

Для произвольного положения точки внутри межфазного слоя  $r > z > 0$  (рисунок 2, б) объем жидкости, экранируемый твердой поверхностью, будет меньше, чем в предыдущем случае. Это приведет к уменьшению значения объемной силы. В предельном случае при расположении точки на границе межфазного слоя и объемной фазы ( $z = r$ ) экранирование прекращается, а значение объемной силы становится равным нулю.

Объемная сила  $F_{об}$  определяет меру внешнего воздействия на объем среды, заключенный в выделенном шаровом элементе. Как указано выше, это воздействие состоит в экранировании части объема жидкости в шаровом элементе разделительной поверхностью. В уравнении Ван-дер-Ваальса внешнее воздействие определяется значением давления  $P$ . Таким образом, каждому положению точки в межфазном слое отвечает определенное значение координаты  $z$  и молярного объема  $V$ , для которого из уравнения Ван-дер-Ваальса можно определить внешнее давление  $P$ , а также давления сил притяжения  $P_{пр}$  и отталкивания  $P_{от}$ . Тогда положению контрольной точки на разделительной поверхности (рисунок 2, а) при  $z = 0$  отвечает точка  $f$  изотермы Ван-дер-Ваальса. При положении точки на границе раздела межфазного слоя и объемной фазы жидкости при  $z = r$  (рисунок 2, в) состояние среды соответствует точке 2 изотермы. Параметры состояния произвольной точки межфазного слоя отвечают точкам изотермы, лежащим на ветви  $2f$ .

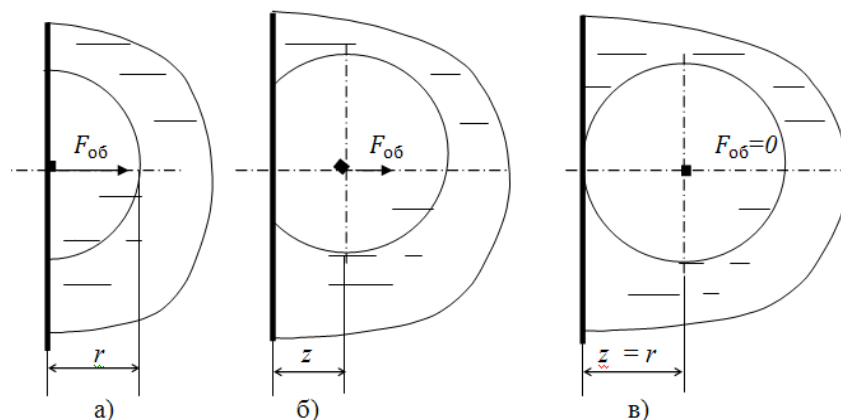


Рисунок 2 – Формирование объемной силы в межфазном слое

На рисунке 2 рассмотрены три положения контрольной точки в межфазном слое: а) контрольная точка лежит на разделительной поверхности; б) произвольное положение контрольной точки в межфазном слое; в) контрольная точка лежит на границе межфазного слоя и объемной фазы.

Для определения зависимости  $z(V)$  воспользуемся геометрическими соотношениями, представленными на рисунок 3. Для удобства заменим начало отсчета координаты  $z$ . На ри-

сунке 2 координата  $z$  отсчитывалась от твердой разделительной поверхности, обозначенной на рисунке 3 жирной линией II. При этом направления координатных осей  $V$  и  $Z$  были противоположными. В дальнейшем отсчет  $z$  будем проводить от границы межфазной поверхности и объемной фазы жидкости (пунктирная линия I).

Положение центра шара (контрольной точки  $C$ ) в межфазном слое определяется значением координаты  $z$ , а также может быть определено через радиус шара  $r$  и значение телесного угла  $\varphi$ :

$$z = r - r \cos\varphi = r (1 - \cos\varphi). \quad (4)$$

Этому положению точки  $C$  отвечает линейная координата  $z$ , значение молярного объема  $V$  и значение давления  $P$ . Толщина межфазного слоя, равная радиусу дальнего действия  $r$ , обозначена на рисунке через  $\delta$ . В нижней части рисунка показаны зависимости  $P(V)$  и  $P(z)$ . Они имеют различный характер. Зависимость  $P(V)$  представляет часть ветви  $af$  изотермы Ван-дер-Ваальса. Точка  $f$  отвечает состоянию среды на разделяющей поверхности II. В этой точке должно выполняться соотношение:

$$\frac{dP(V)}{dV} = 0. \quad (5)$$

так как давление в этой точке экстремально. Зависимость  $P(z)$  удовлетворяет требованию:

$$\frac{dP(z)}{dz} = 0 \text{ при } z = 0. \quad (6)$$

Необходимость этого требования обусловлена тем, что в объемной фазе при  $z < 0$  давление постоянно и равно нулю.

Значение силы, действующей на выделенный шаровой элемент со стороны разделительной твердой поверхности, равна значению давления на ней, умноженному на площадь пятна контакта шарового элемента и твердой поверхности, т.е.

$$F = P_{min} \pi (r \sin\varphi)^2 \quad (7)$$

Однако эта сила приложена в точке  $C$  и распределена по площади круга радиуса  $r$ . Отсюда давление в точке  $C$ , обозначенное на рисунке 3 через  $P$ , может быть найдено из соотношения:

$$P_{min} \pi (r \sin\varphi)^2 = P \pi r^2 \text{ или } \sin^2\varphi = \frac{P}{P_{min}}. \quad (8)$$

Раскрывая значение  $P$  из уравнения Ван-дер-Ваальса с учетом уравнения (1), получим:

$$z = r \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{P}{P_{min}}} \right). \quad (9)$$

Введем безразмерную переменную  $\xi_z = \frac{z}{r}$ .

Тогда уравнение (8) можно переписать:

$$\xi_z = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{P_{min}} \left( \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \right)}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (10) устанавливает связь между значением координаты  $z$  точки межфазного слоя и молярным объемом  $V$  среды в этой точке.

Рассмотренные теоретические положения относились к случаю полного отсутствия межмолекулярного взаимодействия жидкой и твердой фаз. То есть, рассмотрен случай межфазного взаимодействия несмачиваемой жидкости и твердой поверхности. Однако, как указывалось выше, зависимость (10) ставит в соответствие каждому значению удельного объема на ветви  $2f$  изотермы Ван-дер-Ваальса определенное расстояние  $\xi_z$  по толщине межфазного слоя, возмущающее воздействие  $P$ , а также давление сил притяжения  $P_{np}$  и отталкивания  $P_{om}$ . Значение безразмерной координаты  $\xi_z$  изменяется от нуля на границе межфазного слоя и объемной фазы жидкости до единицы на твердой поверхности. При этом внешнее воздействие  $P$  со стороны разделительной твердой поверхности на жидкость также изменяется от нуля до максимального значения (точка  $f$  изотермы).

Очевидно, что максимальная толщина межфазного слоя будет определяться значением радиуса дальнего действия  $r$  молекул жидкости. В точке 2 при  $p=0$  возмущение, вносимое разделительной поверхностью, будет «затухать». Возмущающее воздействие разделительной поверхности на участке изотермы  $f2$  (объемная сила) направлено от поверхности в сторону

объемной фазы. В этом случае твердая поверхность действует на жидкость как отталкивающий магнит. В соответствии со сказанным, уменьшение возмущения при перемещении по ветви изотермы  $f_2$  можно трактовать как уменьшение напряженности поля магнита на поверхности контакта твердого с жидкостью. Это означает возникновение сил притяжения со стороны твердой поверхности, т.е. появление молекулярного притяжения фаз.

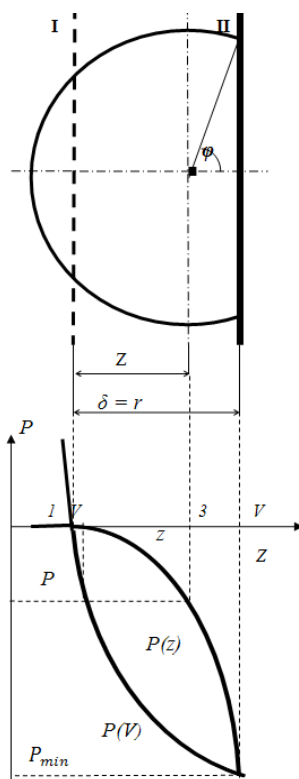


Рисунок 3 – Определение зависимости  $z(V)$

В точке 2 изотермы Ван-дер-Ваальса возмущение исчезает, что свидетельствует о том, что твердая поверхность оказывает на граничащую с ней жидкость такое же воздействие, как сама жидкость в объемной фазе.

Для точек изотермы Ван-дер-Ваальса, лежащих выше точки 2, знак давления  $P$  меняется. То есть, возмущающее действие твердой поверхности на жидкости меняет направление. В этом случае объемная сила направлена из жидкости к твердой поверхности, а сама поверхность действует как притягивающий магнит. При перемещении вверх по изотерме из точки 2 толщина межфазного слоя будет увеличиваться. Решающим фактором в этом случае будет молекулярное взаимодействие твердого и жидкости.

Введем в рассмотрение безразмерный молярный объем, определяемый как:

$$\zeta_v = \frac{V - V_2}{V_3 - V_2}. \quad (11)$$

Значения молярных объемов соответствуют обозначениям точек на рисунке 1. Характерный вид зависимости  $\zeta_z = f(\zeta_v)$  представлен на рисунке 4.

Области положительных значений  $\zeta_v$  соответствует ограниченное смачивание твердой поверхности жидкостью. Отрицательные значения  $\zeta_v$  определяют область смачиваемой твердой поверхности. Приведенный на рисунке 4 график относится к определенной жидкости и отражает ее внутренние свойства при заданной температуре.

Каждая точка на графике отражает свойства взаимодействующей с жидкостью твердой поверхности, характеризуемые краевым углом смачивания  $\theta$ . Такой точке соответствует значение  $\zeta_z$ , определяющее толщину межфазного слоя  $\delta$  для заданной жидкости и твердого вещества. Так, точке М с координатами (1, 1) отвечает состояние межфазного слоя, при котором отсутствует смачивание твердой поверхности жидкостью. Распределение параметров состояния среды в межфазном слое отвечает ветви М0 приведенной кривой.

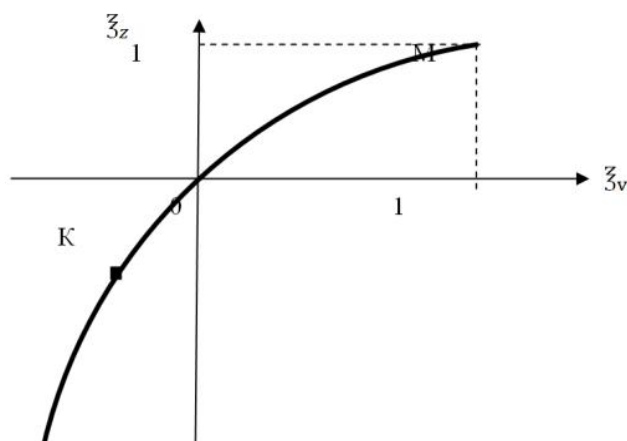


Рисунок 4 – Зависимость  $z_z = f(z_v)$

Область отрицательных значений (III квадрант координатной плоскости) соответствует области смачивания поверхности жидкостью. Точке К соответствует краевой угол смачивания  $\theta < \pi/2$ , а параметры межфазного слоя отвечают участку КО приведенной зависимости и т.д.

### Выводы

1. Показано, что описание структуры жидкости с позиций межмолекулярного взаимодействия возможно на основе теории Ван-дер-Ваальса.
2. Установлено, что участки изотермы Ван-дер-Ваальса, ранее не применявшиеся в научной практике в связи с неустойчивостью состояний вещества, могут быть использованы для описания поверхностных явлений.
3. Показано, что структура межфазного слоя для не смачиваемых твердых поверхностей определяется внутренними свойствами жидкости. Для смачиваемых поверхностей определяющую роль в формировании структуры межфазного слоя играет межмолекулярное взаимодействие твердого с жидкостью.
4. Установлены соотношения, определяющие изменение состояния вещества по толщине межфазного слоя твердое-жидкость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика [Текст] / П.А. Ребиндер: избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
2. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей [Текст] / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
3. Дерягин, Б.В. Вода в дисперсных системах [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
4. Роулинсон, Дж. Молекулярная теория капиллярности [Текст] / Дж. Роулинсон, Б. Уидом. – М.: Мир, 1986. – 375 с.
5. Кикоин, А.К. Молекулярная физика [Текст] / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
6. Кикоин, И.К. Таблицы физических величин: Справочник [Текст] / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
7. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

#### Готовцев Валерий Михайлович

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Управление предприятием»

#### Придатко Юрий Михайлович

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль  
 Кандидат технических наук, доцент, декан архитектурно-строительного факультета  
 Тел.: +7 (4852) 44-03-67

GOTOVTSEV V.M., PRIDATKO Yu.M.

**LAWS OF FORMATION OF INTERFACE LAYERS  
IN COMPOSITE MATERIALS FROM THE POINT OF VIEW  
OF VAN DER WAALS'THEORY**

*Van der Waals' classical approach has been used for description of the state of the liquid in interface layers of composite. It has been demonstrated that the characteristic parts of Van der Waals' isotherm make it possible to evaluate the condition of substance in interface layer. The working design model for the account of surface phenomena has also been substantiated. The equation parameter evaluation of interface layer has been obtained.*

*Keywords: an interphase layer, a composite material.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Rebinder, P.A. Poverhnostnye javlenija v dispersnyh sistemah. Fiziko-himicheskaja mehanika [Tekst] / P.A. Rebinder: izbrannye trudy. – M.: Nauka, 1979. – 384 s.
2. Adamson, A. Fizicheskaja himija poverhnostej [Tekst] / A. Adamson. – M.: Mir, 1979. – 568 s.
3. Derjagin, B.V. Voda v dispersnyh sistemah [Tekst] / B.V. Derjagin, N.V. Churaev, F.D. Ovcharenko i dr. – M.: Himija, 1989. – 288 s.
4. Roulinson, Dzh. Molekuljarnaja teorija kapilljarnosti [Tekst] / Dzh. Roulinson, B. Uidom. – M.: Mir, 1986. – 375 s.
5. Kikoin, A.K. Molekuljarnaja fizika [Tekst] / A.K. Kikoin, I.K. Kikoin. – M.: Nauka, 1976. – 480 s.
6. Kikoin, I.K. Tablicy fizicheskikh velichin: Spravochnik [Tekst] / Pod red. I.K. Kikoina. – M.: Atomizdat, 1976. – 1006 s.
7. Lojczanskij, L.G. Mehanika zhidkosti i gaza [Tekst] / L.G. Lojczanskij. – M.: Nauka, 1978. – 736 s.

**Gotovtsev Valery Mihajlovich**

Yaroslavl state technical university, Yaroslavl  
Doctor of technical science, professor of department «Operation of business»

**Pridatko Yury Mihajlovich**

Yaroslavl state technical university, Yaroslavl  
Candidate of technical science, associate professor, dean of architecturally-building faculty  
Ph.: +7(4852) 44-03-67



ГУЮМДЖЯН П.П., КОКАНИН С.В., ПИСКУНОВ А.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПРИ ЕГО СТАРЕНИИ

*В статье изложены теоретические сведения о теплопроводности пенополистирола строительного назначения в зависимости от условий его эксплуатации. Рассмотрено влияние структуры пеноматериала на его теплофизические свойства. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения коэффициента теплопроводности пенополистирола при его старении. Показано, что теплофизические свойства пенопластов зависят от их структуры. Разрушение ячеистой структуры материала и образование открытой пористости приводит к изменению коэффициента теплопроводности. Сильное влияние на этот показатель оказывает влажность и, в частности, водопоглощение, величина которого увеличивается в результате деструкции пенополистирола.*

*Ключевые слова:* пенополистирол, теплопроводность, деструкция, фотостарение, теплостарение, морозостойкость.

### Постановка задачи исследования

Современное развитие строительной отрасли нашей страны немислимо без применения полимерных материалов. К ним относят и стирольный пенопласт, используемый для теплоизоляции зданий и сооружений. Одним из наиболее ценных свойств пенополистирола, обеспечивающих его широкое применение в строительстве, является его низкая теплопроводность.

При эксплуатации и хранении пенополистирол подвержен естественной деструкции под действием внешних и внутренних факторов. Внутренними факторами являются процессы, связанные с естественной деструкцией полимера. Внешние факторы – это действие жидких агрессивных сред, а также атмосферные воздействия (колебание температуры и влажности) и старение (фото-, тепло- и механохимическое старение). При длительном воздействии этих факторов происходит изменение структуры материала и, как следствие, его физико-механических свойств.

Таким образом, исследование процессов деструкции пенополистирола, которые приводят к нарушению первоначальных свойств материала, является весьма актуальной задачей.

### Сведения о теплопроводности стирольных пенопластов

Известно [1-5], что одним из определяющих факторов, влияющих на теплопроводность пеноматериалов, в том числе стирольных, является ячеистая структура. В работах [2-3] основное внимание уделялось изучению теплопроводности легких жестких пенопластов. Исследования показали, что эффективная теплопроводность пенопластов реализуется в основном за счет полимера-основы и газа, излучения, конвекции. Основной вклад в коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) вносит газовая фаза, так как объемное содержание ее достигает у легких пенополистиролов 97%.

Вклад проводимости полимера в теплопроводность у легких пенопластов на порядок меньше, чем вклад проводимости газовой фазы [2]. Конвективный теплообмен начинает вносить в  $\lambda$  существенный вклад при диаметре ячеек закрытоячеистых пенопластов не менее 1,6-4 мм. При увеличении содержания открытых ячеек вклад конвективного теплообмена повышается, что приводит к значительному изменению коэффициента теплопроводности. Определяющее влияние на значение теплопроводности оказывает состав газовой фазы. Низкий коэффициент теплопроводности имеют газы с более высокой молекулярной массой, и это свойство вспенивающего агента как наполнителя переносится на свойства пеноматериала. Вклад в  $\lambda$  излучения несколько меньше, чем теплопроводности газа в замкнутых ячейках. Он пропорционален размеру ячеек. Теплопроводность пенопластов в направлении вспенивания несколько больше, чем в перпендикулярном направлении [2]. Для легких пенопластов харак-



терна экстремальная зависимость коэффициента теплопроводности от плотности [6]. При изменении плотности от 20 до 50 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности практически не меняется. При более низкой кажущейся плотности  $\lambda$  возрастает как из-за увеличения содержания открытых ячеек и возникновения в результате этого конвективных потоков, так и вследствие увеличения вклада излучения [2-3].

Коэффициент теплопроводности зависит от температуры окружающей среды. Теплопроводные свойства возрастают с увеличением температуры и, наоборот, уменьшаются с понижением температуры за счет разрежения газа внутри ячеек, которое затрудняет теплопередачу [3]. Увеличение влажности пенополистирола приводит к возрастанию теплопроводности. Влияние влаги на теплопроводность пенопластов особенно заметно проявляется при наличии в структуре этих материалов открытых ячеек, воздушных включений и полостей. Согласно данным [3] при замещении воздуха в ячейках водой коэффициент теплопроводности увеличивается от 0,023 до 0,058 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Увеличение  $\lambda$  превосходит значение, которое могло бы быть на основе разницы между  $\lambda$  воздуха и  $\lambda$  воды [3]. Это объясняется [6] тем, что влага, прежде всего, заполняет мелкие ячейки, наиболее эффективно влияющие на теплопроводность. В пенополистироле, изготовленном из гранул по беспрессовой технологии, вода заполняет пространство преимущественно вокруг точек соприкосновения, т.е. в местах сшития отдельных гранул, и образует тепловые мостики. Наличие в структуре пенополистирола крупных ячеек, увеличивающих пористость материала (таблица 1), обуславливает возникновение конвективных газовых потоков, ухудшающих теплоизоляционные свойства [2-4, 6].

Таблица 1 – Зависимость коэффициента теплопроводности пенополистирола от размера пор (по Павлову В.А. [3])

Размеры пор, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	
	при 0°С	при 100°С
Менее 0,1	0,0238	0,0308
0,1	0,0242	0,0316
0,5	0,0261	0,0361
1,6	0,0279	0,0419
2,6	0,0326	0,0523
3,0	0,0442	0,0837

### Методы и материалы исследования

Исследования процесса тепло- и фотостарения пенополистирола проводились на экспериментальных установках ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) облучения, разработанных и изготовленных на кафедре «Строительная механика» ИГАСУ.

Исследования процесса старения пенополистирола при низких температурах проводились с использованием криостата компрессионно-термоэлектрического «Миконта – МТ» испытательной лаборатории АНО «Ивановостройиспытания». При различных условиях криостатирования (окружающая среда и температура) образцы подвергались попеременному замораживанию и оттаиванию с количеством циклов – 75, 100 и 150. В качестве условий криостатирования применялись следующие параметры окружающей среды: в сухом состоянии (температура испытаний -54°С ±2°С) и в водонасыщенном состоянии (температура испытаний -45°С ±2°С).

Теплопроводность определяли по ГОСТ 7076-87 на образцах, отобранных согласно ГОСТ 15588-86 беспрессового пенополистирола марок ПСБ-С М15У (ЗАО «Мосстрой-31»), ПСБ-С-25 (ООО «ТРЕС+») ПСБ-С-35 (ЗАО «Мосстрой-31») и экструзионного пенополистирола марок URSA N-III («URSA D-land GmbH») и Полиспен-Стандарт (ООО «Полиспен») с линейными размерами [(250×250×40) ± 0,5] мм. Первоначальные характеристики исследуемых материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства исследуемых пенополистирольных материалов

Наименование показателя, ед. изм.	Марка пенополистирола				
	ПСБ-С М15У	ПСБ-С-25	ПСБ-С-35	URSA N-III	Полиспен-Стандарт
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8,2	17,4	27,8	33,7	34,8
Теплопроводность, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	0,052	0,039	0,038	0,031	0,026

Испытания проводились на предварительно градуированном приборе испытательной лаборатории АНО «Ивановстройиспытания». Расположение образца – горизонтальное при направлении теплового потока сверху вниз. В процессе испытания разность температур лицевых граней образца составляла 10-30 К. Средняя температура образца при испытании составляла 22°С.

После установки заданных значений температур рабочих поверхностей плит прибора, последовательно через каждые 300 с проводили измерения: сигналов тепломера и датчиков температур лицевых граней образца; мощности, подаваемой на нагреватель зоны измерения горячей плиты прибора. Тепловой поток через испытываемый образец считали установившимся (стационарным), если значения термического сопротивления образца, вычисленные по результатам пяти последовательных измерений сигналов датчиков температур и плотности теплового потока, отличаются друг от друга менее чем на 1%, при этом эти величины не возрастают и не убывают монотонно. После достижения стационарного теплового режима измеряли толщину помещенного в прибор образца штангенциркулем с погрешностью не более 0,5%. После окончания испытания определяли массу образца, и проводили обработку экспериментальных данных согласно п.8 ГОСТ 7076-87.

Аппроксимация полученных экспериментальных данных произведена с использованием полиномиальной функции третьей степени.

### Исследование теплопроводности пенополистирола при испытании его на фото-старение

Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола различных марок при УФ и ИК старении представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Согласно полученным данным коэффициент теплопроводности пенополистиролов, изготовленных беспрессовым способом, зависит от плотности пеноматериала и размера синтетических гранул. Так, коэффициент теплопроводности ППС марки ПСБ-С М15У к 14 суткам экспонирования в ультрафиолетовом свете составляет 0,058 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), что на 10,3% больше своего первоначального значения. А к 84 суткам выдержки  $\lambda$  увеличивается на 11,9%. У пенополистирола марки ПСБ-С-25 коэффициент теплопроводности к 14 суткам увеличивается на 2,5%, к 28 суткам – на 4,9%, а к 84 суткам – на 9,3%. Увеличение  $\lambda$  для ПСБ-С-35 следующее: для 14 суток – на 2,6%, а 28 суткам – на 7,3%. Пенополистирол, изготовленный методом экструзии, имеет большую стойкость к УФ облучению.

Так, теплопроводность образцов марки URSA N-III к 14 суткам испытаний не изменяется, к 28 суткам  $\lambda$  увеличивается на 3,1%, а к 84 суткам – на 6,1%. У пенополистирола «Полиспен – Стандарт»  $\lambda$  к 28 суткам увеличивается на 10,3%.

Коэффициент теплопроводности пенопласта марки ПСБ-С М15У в 14 суточном возрасте экспонирования увеличивается на 7,1% (рисунок 2), а к 28 суткам выдержки  $\lambda$  – на 10,3%, а к 84 суткам – на 11,9%. У пенополистирола марки ПСБ-С-25 коэффициент теплопроводности к 14 суткам увеличивается на 2,5%, а к 84 суткам – на 4,9%. Увеличение  $\lambda$  для ПСБ-С-35 следующее: для 14 суток – на 2,6%, а 28 суткам – на 5%.

Теплопроводность образцов марки URSA N-III к 14 суткам испытаний не изменяется, к 28 суткам  $\lambda$  увеличивается на 3,1%. У пенополистирола «Полиспен – Стандарт» аналогично  $\lambda$  к 14 суткам испытаний не изменяется, а к 84 суткам увеличивается на 3,7%.

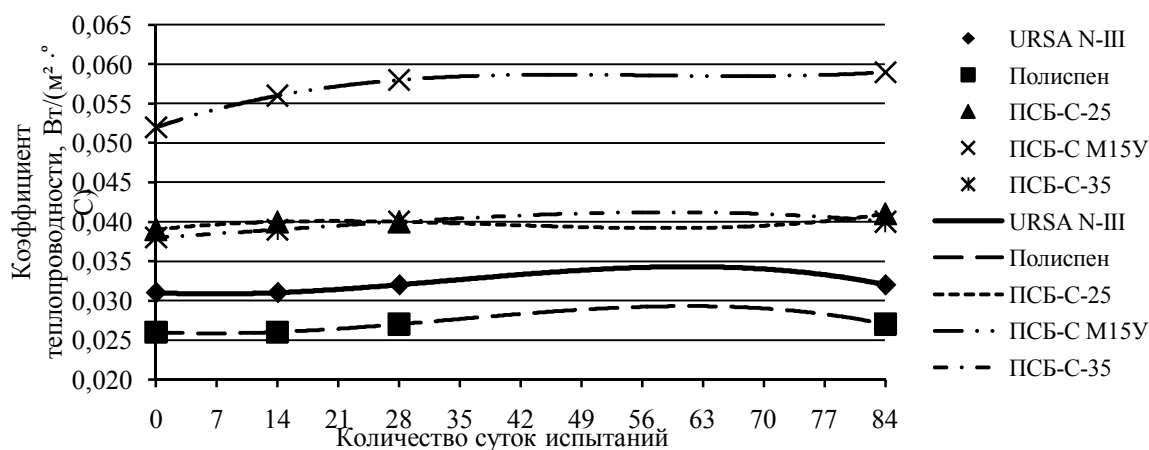


Рисунок 1 – Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола от количества суток испытаний на УФ облучение

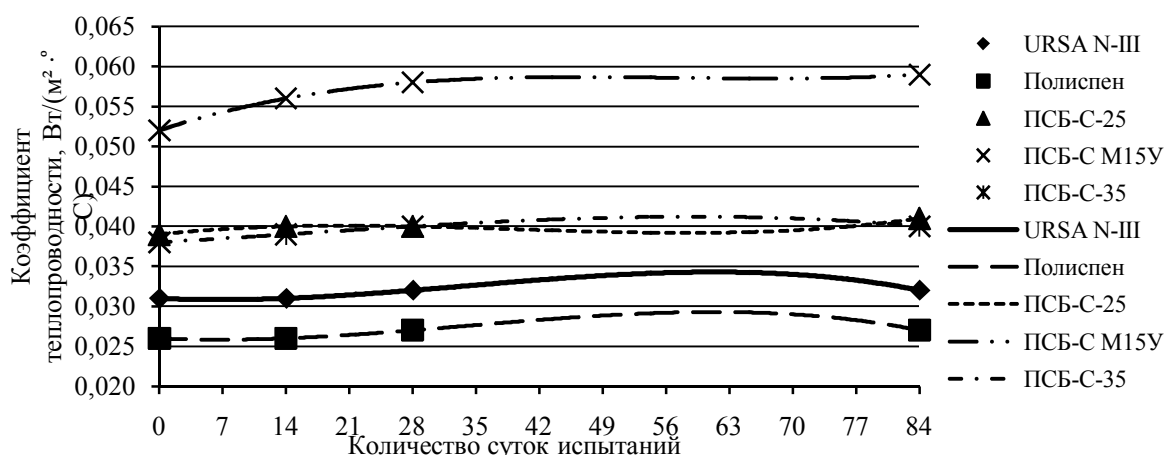


Рисунок 2 – Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола от количества суток испытаний на ИК облучение

**Исследование теплопроводности пенополистирола при испытании его на длительное водонасыщение**

Графики зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола различных марок при его длительной выдержке в воде представлены на рисунке 3.

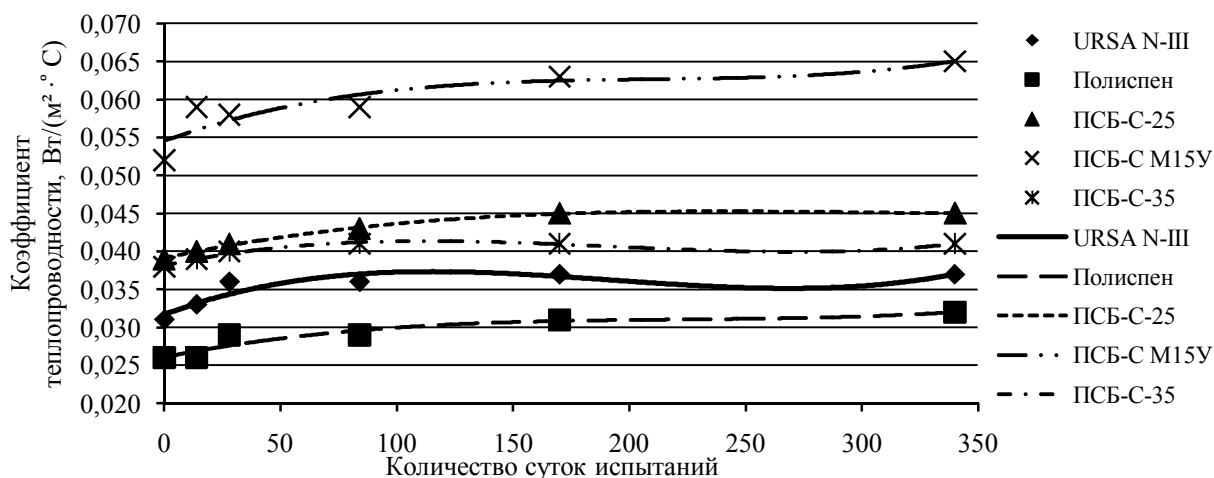


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола от количества суток испытаний на длительное водопоглощение

Коэффициент теплопроводности пенополистирола ПСБ-С М15У после выдержки в воде в течение 14 суток увеличивается на 11,8%, к 170 суткам – на 17,4%. Для ППС марки ПСБ-С-25  $\lambda$  к 14 суткам водонасыщения возрастает на 2,5%, к 84 суткам – на 9,3%, а к 170 суткам – на 13,3%. Коэффициент теплопроводности пенопласта ПСБ-С-35 к 14 суткам возрастает на 2,6%, к 84 суткам – на 7,3%.

Теплопроводность пенополистирольных образцов марки URSA N-III к 14 суткам испытаний увеличивается на 6,1%, к 28 суткам  $\lambda$  увеличивается на 13,9%, а к 170 суткам – на 16,2%. У пенополистирола «Полиспен – Стандарт»  $\lambda$  в первые 14 суток выдержки не изменяется, к 28 суткам увеличивается на 10,3%, к 170% – на 16,3%, а к 340 суткам – на 18,8%.

### Исследование теплопроводности пенополистирола при испытании его на теплостарение

Графики зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола при теплостарении в условиях повышенных и пониженных температур представлены на рисунках 4-5.

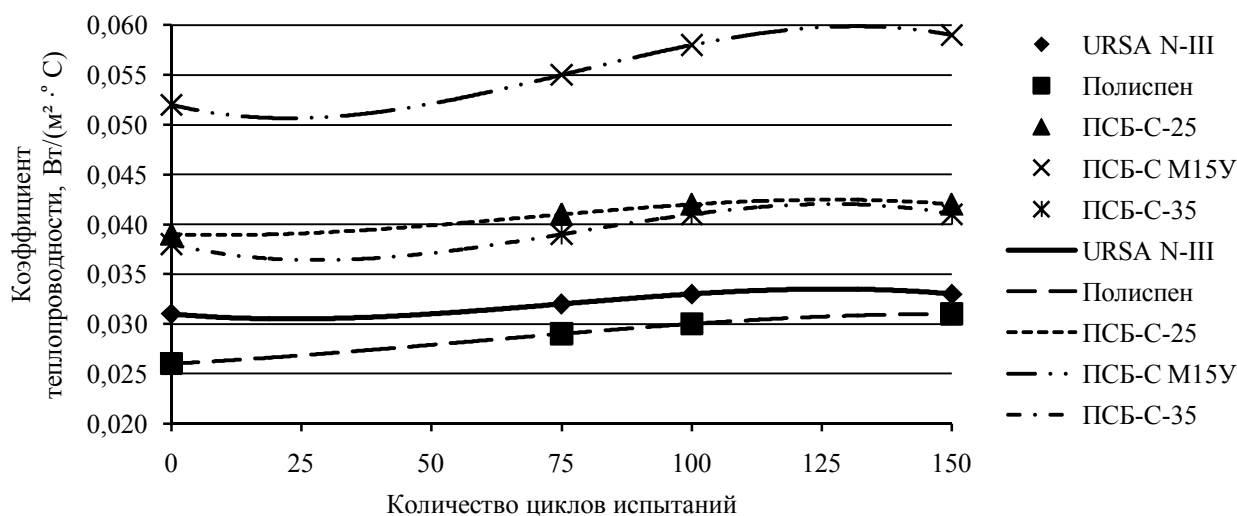


Рисунок 4 – Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола от количества суток испытаний на морозостойкость в сухом состоянии при температуре  $-54^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Экспериментальные данные свидетельствуют об увеличении коэффициента теплопроводности при испытании пеноматериалов на морозостойкость. Так, для ППС ПСБ-С-25  $\lambda$  к 75 циклам замораживания-оттаивания увеличивается на 4,9%, а к 150 циклам – на 7,1%. Для пенополистирола марки ПСБ-С М15У  $\lambda$  к 75 циклам выдержки возрастает на 5,5%, а к 150 циклам – на 11,9%. Более плотный пенопласт марки ПСБ-С-35 после 75 циклов попеременного замораживания-оттаивания имеет коэффициент теплопроводности равный 0,039 Вт/(м²·°C), что на 2,6% больше своего первоначального значения. Подобно ведет себя экструзионный пенополистирол. Коэффициент теплопроводности пенопласта URSA N-III к 75 циклам увеличивается на 3,1%, а к 150 циклам – на 6%. При испытании пенополистирола на морозостойкость в водонасыщенном состоянии наблюдается наибольшее нарушение теплофизических свойств материала. Так, теплопроводность пенополистирола марки ПСБ-С-25 к 75 циклам возрастает на 7,1%, а к 150 циклам – на 9,3%. Для материала ПСБ-С-35  $\lambda$  к 150 циклам составляет 0,041 Вт/(м²·°C), что на 7,3% больше значений до испытания. Аналогично ведет себя пенополистирол, изготовленный экструзией. Наибольшее ухудшение теплофизических свойств наблюдается у пенополистирола «Полиспен-Стандарт». Так, к 150 циклам выдержки коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,032$  Вт/(м²·°C). Данный показатель на 18,8% превосходит показания до испытаний на морозостойкость.

При испытании пенополистирола на теплостарение при температуре  $+60^{\circ}\text{C}$  наибольшее ухудшение теплофизических свойств прослеживается у ППС марки ПСБ-С М15У. Так,  $\lambda$  к 14 суткам испытаний увеличивается на 11,9%, к 28 суткам – на 14,8%, а к 84 суткам – на 18,8%. У пенопласта марки ПСБ-С-35 коэффициент теплопроводности в первые 14 суток

увеличивается на 5%, а к 84 суткам – на 9,5%. Экструзионный пенополистирол URSA N-III к 14 суткам экспонирования имеет  $\lambda = 0,033 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , что на 6,1% больше своего первоначального значения. К 84 суткам  $\lambda$  увеличивается на 8,8%.

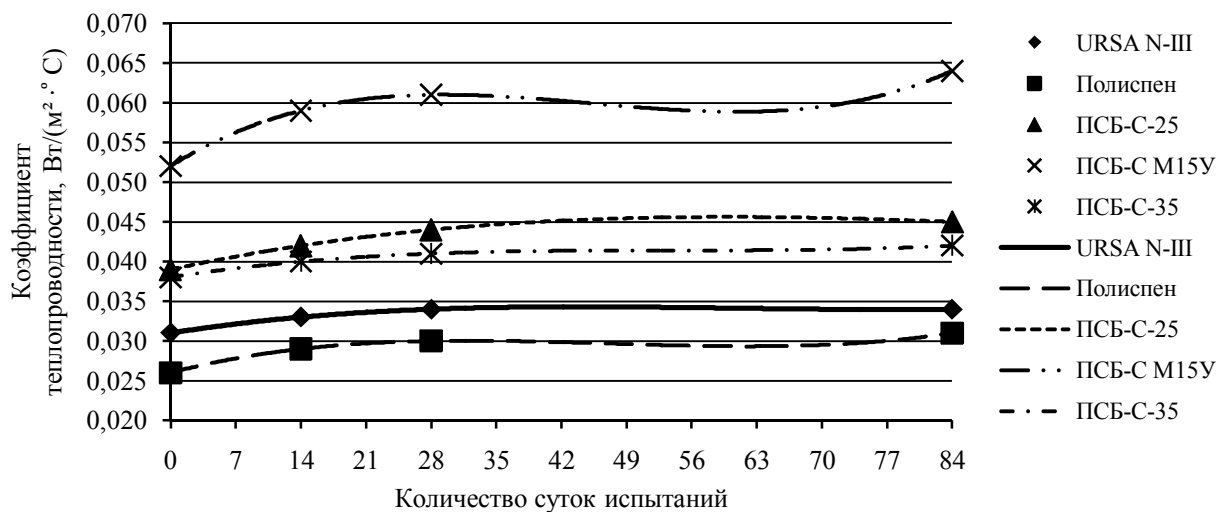


Рисунок 5 – Зависимости коэффициентов теплопроводности пенополистирола от количества суток испытаний на теплостарение при температуре  $+60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

### Выводы

Экспериментальные данные подтверждают зависимость теплофизических свойств пенопластов от их структуры. Разрушение ячеистой структуры материала и образование открытой пористости приводит к изменению коэффициента теплопроводности. Сильное влияние на этот показатель оказывает влажность и, в частности, водопоглощение, величина которого увеличивается в результате деструкции пенополистирола.

Наибольшее увеличение коэффициента теплопроводности происходит при воздействии на стирольный пенопласт ультрафиолетом. Этому способствует развитие поверхностной эрозии материала, приводящее к образованию открытой пористости.

При температурных воздействиях повышение теплопроводности связано с разрушением структуры пенополистирола за счет уменьшения степени замкнутости ячеек, разрушение которых происходит за счет перепада давления газа внутри и снаружи ячеек.

Таким образом, при испытании пенополистирольных материалов на старение экспериментальные данные свидетельствуют о нарушении теплофизических свойств, выраженные коэффициентом теплопроводности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клемпнер, Д. Полимерные пены и технологии вспенивания [Текст] / Д. Клемпнер, В. Сенджаревич // Перевод с англ. языка под ред. А.М. Чеботаря. – СПб.: Профессия, 2009. – 600 с.
2. Дементьев, А.Г. Структура и свойства пенопластов [Текст] / А.Г. Дементьев, О.Г. Тараканов – М.: Химия, 1983. – 176 с.
3. Павлов, В.А. Пенополистирол [Текст] / В.А. Павлов – М.: Химия, 1973. – 240 с.
4. Уайт, Дж.Л. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины [Текст] / Дж.Л. Уайт, Д.Д. Чой // Перевод с англ. языка под ред. Е.С. Цобкалло. – СПб.: Профессия, 2007. – 256 с.
5. Коканин, С.В. Состав, структура и свойства пенополистирола [Текст] / С.В. Коканин // Воскресенский Владимир Александрович (к 95-летию со дня рождения): материалы научных трудов Третьих Воскресенских чтений «Полимеры в строительстве». – Казань: Казанский гос. архит.-строит. ун.-т., 2009. – С. 43-44.
6. Романенков, И.Г. Физико-механические свойства пенных пластмасс [Текст] / И.Г. Романенков. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1970.

### Гуюмджян Перч Погосович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных материалов»  
 Тел.: +7 (4932) 41-39-06

**Коканин Сергей Владимирович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Производство строительных материалов», ассистент кафедры «Строительная механика»  
Тел.: +7 (960) 513-34-24  
E-mail: s.kokanin@yandex.ru

**Пискунов Александр Альбертович**

Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России, г. Иваново  
Подполковник внутренней службы, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пожарная профилактика»  
Тел.: +7 (915) 832-53-21

---

GUYUMDZHIAN P.P., KOKANIN S.V., PISKUNOV A.A.

**THERMAL PROPERTIES OF FOAM POLYSTYRENE  
AT ITS AGEING RESEARCH**

*The theoretical data, concerning foam polystyrene of building appointment heat conductivity depending on conditions of its operation are set forth in this article. Structure influence of foam material on its thermal properties is considered. Results of experimental researches of change of coefficient of heat conductivity of expanded polystyrene at its ageing are presented. It is shown that thermal properties of polyfoams depend on their structure. Destruction of cellular structure of a material and formation of open porosity leads to change of heat conductivity factor. Humidity and, in particular, the water absorption which size increases as a result of destruction of expanded polystyrene, renders high impact on this indicator.*

**Keywords:** expanded polystyrene, heat conductivity, destruction, photodegradation, heat ageing, frost resistance.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Klempler, D. Polimernye peny i tehnologii vspenivaniya [Tekst] / D. Klempler, V. Sendzharevich // Perevod s angl. jazyka pod red. A.M. Chebotarja. – SPb.: Professija, 2009. – 600 s.
2. Dement'ev, A.G. Struktura i svojstva penoplastov [Tekst] / A.G. Dement'ev, O.G. Tarakanov – M.: Himija, 1983. – 176 s.
3. Pavlov, V.A. Penopolistirol [Tekst] / V.A. Pavlov – M.: Himija, 1973. – 240 s.
4. Uajt, Dzh.L. Polijetilen, polipropilen i drugie poliolefiny [Tekst] / Dzh.L. Uajt, D.D. Choj // Pe-revod s angl. jazyka pod red. E.S. Cobkallo. – SPb.: Professija, 2007. – 256 s.
5. Kokanin, S.V. Sostav, struktura i svojstva penopolistirola [Tekst] / S.V. Kokanin // Voskresenskij Vladimir Aleksandrovich (k 95-letiju so dnja rozhdenija): materialy nauchnyh trudov Tret'ih Voskresenskih chtenij «Polimery v stroitel'stve». – Kazan': Kazanskij gos. arhit.-stroit. un.-t., 2009. – S. 43-44.
6. Romanenkov, I.G. Fiziko-mehanicheskie svojstva penistyh plastmass [Tekst] / I.G. Romanenkov. – M.: Komitet standartov, mer i izmeritel'nyh priborov pri Sovete Ministrov SSSR, 1970.

**Guyumdzhyan Perch Pogosovich**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo  
Doctor of technical science, professor of department «Manufacture of building materials»  
Ph.: + 7(4932) 41-39-06

**Kokanin Sergey Vladimirovich**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo  
Post-graduate student of department «Manufacture of building materials», assistant to department «Building mechanics»  
Ph.: +7(960) 513-34-24  
E-mail: s.kokanin@yandex.ru

**Piskunov Alexander Albertovich**

Ivanovo institute of the state fire service of the Ministry of Emergency Measures of Russia, Ivanovo  
Lieutenant colonel of internal service, candidate of technical science, associate professor of department «Fire preventive maintenance»  
Ph.: +7(915) 832-53-21

КОНОРЕВ А.С., НИКОЛЕНКО Д.А., НИКОЛЕНКО М.А., АКУЛОВ В.В.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ РЕМОНТЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

*Разработан метод оптимизации принимаемых решений при ремонте эксплуатируемых автомобильных дорог, позволяющий выбрать наиболее эффективные варианты ремонта, с использованием метода и критериев оценки уровня динамического воздействия транспортных средств на автомобильную дорогу. В основе метода лежит разработанная математическая модель взаимодействия «автомобиль – дорога». Использование данного метода позволяет на основе динамического мониторинга состояния дорожных конструкций назначить ремонтные работы, обеспечивающие наибольший послеремонтный срок службы.*

**Ключевые слова:** остаточный срок службы дорожной одежды; ровность дорожного покрытия; динамическое воздействие транспортных средств на дорожную конструкцию; оптимизация финансирования строительства.

В настоящее время дорожные работы в основном заключаются не в строительстве новых автомобильных дорог, а в ремонте и содержании уже существующих. По данным Росавтодора на 01. 01. 2010 г. 60,4% автомобильных дорог федерального значения не соответствуют нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям [1]. Это связано с тем, что автомобильная дорога в процессе эксплуатации неизбежно разрушается и такие факторы, как недоремонт, накопившаяся усталость дороги, увеличение количества грузового транспорта с нагрузками на ось, превышающими расчетные, приводят к интенсивному разрушению существующей сети дорог [2]. Для того чтобы решить возникшую проблему эффективными и рациональными методами необходимо оптимизировать проводимые ремонтные мероприятия по видам и времени их выполнения, учитывая реальные объемы финансирования.

Один из рациональных путей повышения долговечности и работоспособности дорожных конструкций – снижение динамических перегрузок. Критерием динамических перегрузок является динамический коэффициент ( $K_{дин}$ ). Динамический коэффициент показывает во сколько раз нагрузка от движущегося по автомобильной дороге транспортного средства превышает статическую нагрузку от этого же автомобиля. В соответствии с нормативным документом значение динамического коэффициента принимают равным 1,3 [3]. Следует отметить, что величина динамического коэффициента зависит от ровности покрытия автомобильной дороги, скорости движения, массы автомобиля и его конструктивных особенностей. Значение динамического коэффициента на недавно построенной или отремонтированной автомобильной дороге значительно ниже принимаемого при проектировании значения 1,3, но в процессе эксплуатации из-за ухудшения ровности покрытия проезжей части, увеличения скоростных режимов движения и перегрузки транспортных средств фактические значения динамического коэффициента в 2 и более раза могут превышать установленную величину. Исходя из этого, при оценке динамического воздействия, все значения коэффициента динамичности, превышающие нормативное значение (1,3) расцениваются как динамические перегрузки. Рассчитываемый динамический коэффициент позволяет оценить уровень динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию и выявить участки, испытывающие динамические перегрузки.

Снижение динамических перегрузок, а, следовательно, увеличение срока службы дорожных конструкций, можно обеспечить за счет проведения различных мероприятий:

- ограничение скорости движения транспортных средств, для обеспечения допустимого значения динамического коэффициента;
- ограничение проезда тяжело нагруженных транспортных средств, для снижения осевых нагрузок на дорожную конструкцию;

- восстановление ровности дорожного покрытия ремонтными работами, назначенными на основе анализа характеристик динамического воздействия транспортного потока.

Каждое мероприятие по снижению динамических перегрузок дорожных конструкций имеет свои преимущества и недостатки. Первые два мероприятия носят организационный характер и позволяют при минимуме капитальных затрат замедлить разрушение дорожных конструкций за счет снижения динамического воздействия транспортного потока.

Восстановление ровности дорожных покрытий приводит как к снижению динамического воздействия транспортных средств на дорожные конструкции, так и к повышению эффективности работы автомобильного транспорта за счет снижения себестоимости перевозок [4].

Различные виды ремонтных работ по восстановлению ровности дорожных покрытий (выравнивающий слой + поверхностная обработка, фрезерование слоя + устройство нового слоя, термопрофилирование и т.д.) обеспечивают различный уровень состояния покрытия по показателю ровности сразу после выполнения работ, а также различную динамику снижения показателя ровности в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Учитывая, что при всех равных условиях (характеристики транспортного потока, скоростные режимы движения) динамическое воздействие транспортного потока связано с показателем ровности дорожного покрытия, можно рассчитать прогнозируемый период работы дорожной конструкции, во время которого она не будет испытывать динамических перегрузок.

Цикл теоретических и экспериментальных исследований выполненных в ДорТрансНИИ РГСУ по заданию Росавтодора (по плану НИОКР) [4, 5] позволил предложить новые подходы к выбору стратегии ремонта автомобильных дорог на основе динамического мониторинга состояния дорожных конструкций (рисунок 1).

Для участков автомобильных дорог, транспортно-эксплуатационное состояние которых не удовлетворяет нормативным требованиям, выполняются работы по оценке динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию с учетом фактической ровности дорожного покрытия и скоростных режимов движения.

В основе расчетов динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию лежит модель взаимодействия «автомобиль-дорога», рассчитывающая динамическое воздействие транспортных средств на дорожное покрытие, движущихся по автомобильной дороге с заданным микропрофилем и с определенной скоростью (рисунок 2). Модель реализована на основе программного комплекса «Mathcad», и позволяет определить амплитудно-временную зависимость динамического коэффициента воздействия на автомобильную дорогу.

Для расчета задается несколько входных параметров, которые позволяют реализовывать различные модели движения автомобиля по неровному покрытию:

- масса транспортного средства ( $M$ );
- расстояние между осями автомобиля ( $B$ );
- микропрофиль поверхности ( $L$ );
- коэффициенты жесткости рессор каждой оси ( $c_1, c_2$ );
- коэффициенты вязкого трения в амортизаторах каждой оси ( $b_1, b_2$ );
- масса каждой оси выбранного транспортного средства ( $m_1, m_2$ );
- коэффициенты жесткости шин колеса ( $s_1, s_2$ );
- скорость движения автомобиля ( $V$ ).

При исследовании динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию, наряду с методами компьютерного моделирования, наиболее целесообразным представляется использование экспериментальных средств и методов исследований. Поэтому для оценки реального динамического воздействия и подтверждения адекватности разработанной модели был проведен ряд натурных экспериментов на автомобильных дорогах Северо-Кавказского региона. Для регистрации колебательного воздействия автомобиля на покрытие использовали мобильный виброизмерительный комплекс, разработанный в ДорТрансНИИ, с установкой датчика-виброакселерометра на заднюю ось автомобиля [4]. При движении автомобиля по опытным участкам с фиксированными скоростями и полной мас-



сой, осуществлялась регистрация колебательного воздействия автомобиля на покрытие. Основной анализ экспериментальных данных послужили амплитудно-временная и амплитудно-частотная характеристики регистрируемого сигнала. Проведенный эксперимент подтвердил адекватность разработанной модели.

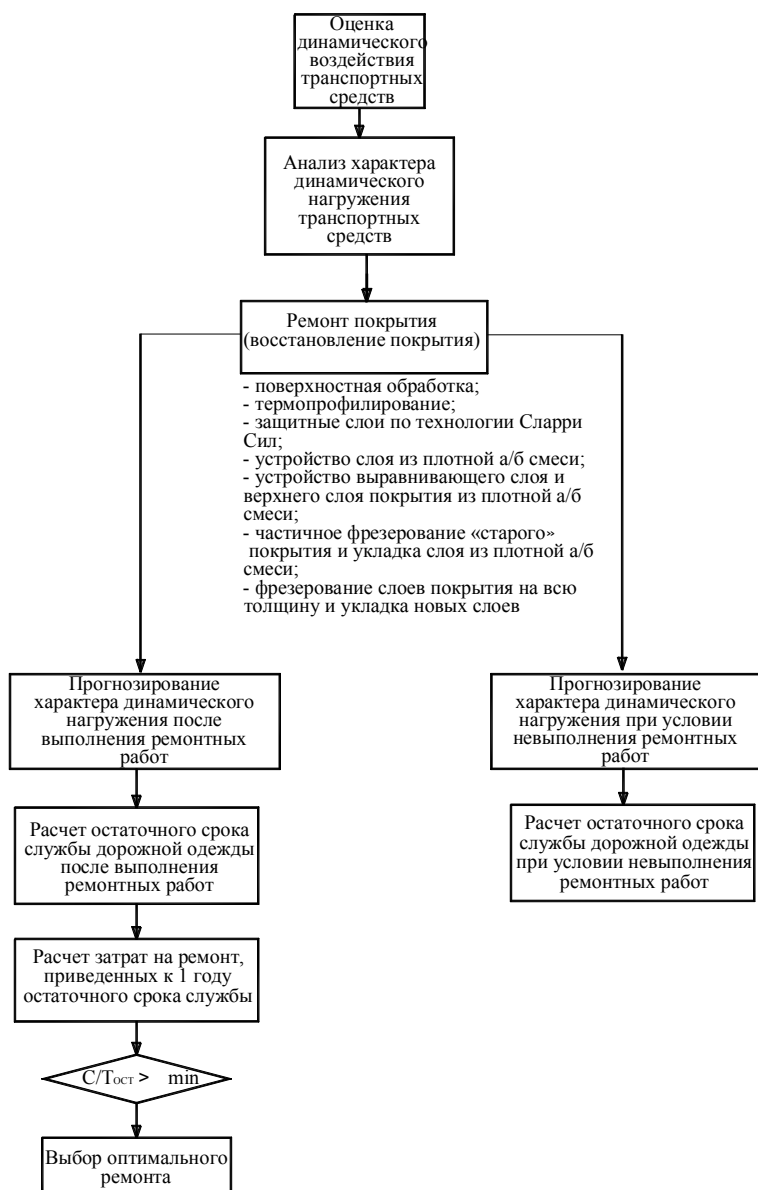


Рисунок 1 – Метод оптимизации принимаемых решений

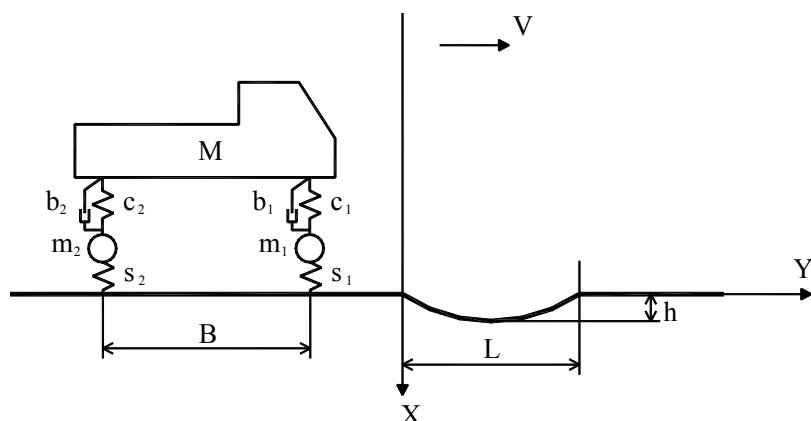


Рисунок 2 – Модель взаимодействия «автомобиль-дорога»

Применение данного способа, разработанного в ДорТрансНИИ для оценки динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию, дает возможность судить об уровне динамического воздействия движущегося автомобиля на покрытие дорожной одежды по следующим критериям [6]:

- максимальный динамический коэффициент на участке (1):

$$K_{\text{дин}}^{\text{max}} = \max_{t \in [t_1, t_2]} K_{\text{дин}}(t), \quad (1)$$

где  $t_1$  – время начала прохождения участка;  $t_2$  – время конца прохождения участка;  $t$  – время прохождения участка.

Этот показатель связан с наибольшей локальной неровностью дорожного покрытия и не отражает всей картины динамического воздействия транспортных средств на заданном участке.

- средний динамический коэффициент (2) является интегральным показателем на участке, он так же не может выступать в качестве основного критерия оценки динамического воздействия транспортных средств, так как является усредненным значением, а вследствие этого мало информативен:

$$K_{\text{дин}}^{\text{ср}} = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} K_{\text{дин}}(t) dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  – совокупность интервалов на отрезке  $[t_1, t_2]$ , на которых динамический коэффициент больше единицы;

- максимальный динамический коэффициент 95% обеспеченности (3), этот показатель характеризует динамическое воздействие на 5% участка автомобильной дороги, на которых динамический коэффициент находится в своих максимальных значениях и именно этот критерий в данном способе предложено использовать как основной для определения уровня динамического воздействия транспортных средств на автомобильную дорогу.

$$K_{\text{дин}}^{95\%} = gnorm\left(0.95, mean\left(K_{\text{дин}_i}(t)\right), stdev\left(K_{\text{дин}_i}(t)\right)\right). \quad (3)$$

Это связано с тем, что согласно нормативному документу по расчету нежестких дорожных одежд [3] предельный коэффициент разрушения (равный отношению суммарной протяженности участков дороги, требующих ремонта, к общей протяженности) для дорог I, II категории составляет 5%. Поэтому предложена оценка динамического воздействия с использованием максимального динамического коэффициента на 5% протяженности участка ( $K_{\text{дин}}^{95\%}$ ), что позволяет прогнозировать разрушение в зонах, подверженных наибольшим динамическим перегрузкам. Эти зоны выступают концентраторами напряжений и являются источниками больших разрушений дорожной одежды.

Расчет остаточного срока службы дорожных конструкций после выполнения ремонтных работ осуществляется с учетом суммарного количества приложений нагрузки (с заданным динамическим коэффициентом) и увеличения общего модуля упругости дорожной одежды. Алгоритм расчета остаточного срока службы показан на рисунке 3.

В разработанном методе оптимизации принимаемых решений для каждого предложенного вида ремонта выполняется расчет динамических характеристик нагружения после проведения ремонтных работ и их прогнозирование на период эксплуатации. Таким образом, для видов ремонта, не обеспечивающих существенного снижения динамического воздействия транспортных средств, суммарное воздействие транспортного потока на дорожную конструкцию будет значительно выше, что приведет к снижению ее остаточного срока службы.

Анализ эффективности вложения финансовых ресурсов в реализацию планов повышения транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог является важным элементом успешной работы дорожной отрасли в условиях ограниченного финансирования. Показатели эффективности финансовых вложений (инвестиций) могут быть получены при сопоставлении результата, получаемого от реализации плана ремонтного мероприятия и затратами на его осуществление рядом других способов. Один из них – отношение необходимых затрат к получаемому результату, означает затраты, приходящиеся на единицу достигаемого результата. Отношение финансовых затрат к остаточному сроку службы дорожной

конструкции позволяет оценить затраты, приведенные к одному году эксплуатации, и выбрать наиболее оптимальный вид ремонта дорожного покрытия.

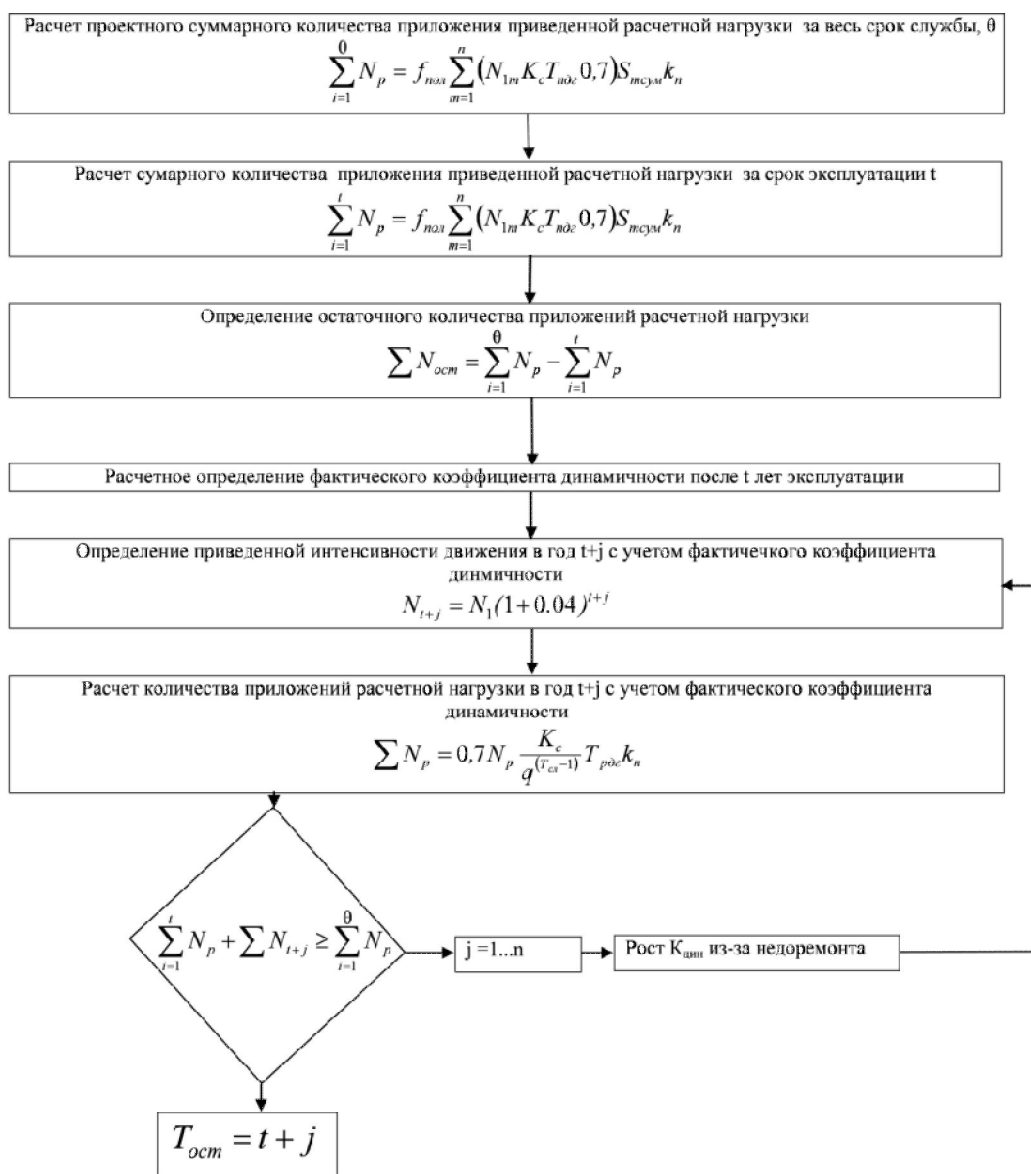


Рисунок 3 – Алгоритм расчета остаточного срока службы дорожной одежды

На основании проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1. Разработка оптимальной стратегии ремонта автомобильной дороги должна выполняться с учетом срока службы дорожной конструкции, обеспечиваемого различными видами ремонтных работ. При этом продление срока службы автомобильной дороги после ремонта обусловлено снижением динамического воздействия транспортных средств (все виды ремонта по восстановлению ровности).

2. Для обоснованного выбора стратегии ремонта автомобильной дороги предлагается проведение динамического мониторинга с использованием виброизмерительной аппаратуры, позволяющего оценить реальное динамическое воздействие транспортных средств на автомобильной дороге.

3. Оценка реального динамического воздействия транспортных средств на автомобильной дороге с учетом фактической ровности позволяет определять эффективность ремонтных мероприятий по восстановлению ровности и прогнозировать ухудшение эксплуатационного состояния дорожной конструкции в случае невыполнения ремонтных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожное хозяйство России. Цифры и факты. Справочно-иллюстрационный материал [Текст] / Мин. Транс. РФ ФДА. – М., 2010. – 236 с.
2. Илиополов, С.К. Динамика дорожных конструкций [Текст] / С.К. Илиополов, М.Г. Селезнев, Е.В. Углова. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2002. – 258 с.
3. Отраслевые дорожные нормы. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст]. – М., 2001 – С. 210.
4. Отчет по теме НИОКР «Исследование влияния ровности дорожных покрытий на величину динамических нагрузок в дорожных конструкциях с разработкой предложений» / Гос. контракт № ПО 12/429-1, Ростов н/Д, 2004. – 150 с.
5. Отчет по теме НИОКР «Разработка метода оптимизации принимаемых решений при ремонте эксплуатируемых автомобильных дорог на основе анализа характеристик динамического (вибрационного) нагружения транспортного потока» / Гос. контракт №ПО 12/442, Ростов н/Д, 2007. – 166 с.
6. Конорев, А.С. Методика оценки динамических перегрузок [Текст] / Е.В. Углова, Д.А. Николенко, А.С. Конорев // Известия ОрелГТУ. – Орел: ОрелГТУ. – 2008. – 82-87 с.

**Конорев Александр Сергеевич**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Младший научный сотрудник  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Николенко Денис Александрович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Николенко Максим Александрович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Акулов Владимир Владимирович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Магистрант  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

---

KONOREV A.S., NIKOLENKO D.A., NIKOLENKO M.A., AKULOV V.V.

**OPTIMIZATION OF ACCEPTED DECISIONS AT REPAIR  
OF MAINTAINED HIGHWAYS**

*A method for optimizing decisions in the repair of roads operated, allowing you to select the most effective options for repair, using the method and criteria for assessing the level of the dynamic effects of vehicles on the roads. Method is based on the developed mathematical model of interaction between the «car - the road». Using this method makes it possible, based on dynamic monitoring of road constructions assign repair work, providing the greatest after repair life.*

***Keywords:** residual life of the pavement, pavement smoothness, dynamic effects of vehicles on the road design, the optimization of construction financing.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Dorozhnoe hozjajstvo Rossii. Cifry i fakty. Spravochno-illjustracionnyj material [Tekst] / Min. Trans. RF FDA. – М., 2010. – 236 с.

2. Iliopolov, S.K. Dinamika dorozhnyh konstrukcij [Tekst] / S.K. Iliopolov, M.G. Seleznev, E.V. Uglova. – Rostov n/D: Rost. gos. stroit. un-t, 2002. – 258 s.
3. Otrasleyve dorozhnye normy. ODN 218.046-01 Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd [Tekst]. – M., 2001 – S. 210.
4. Otchet po teme NIOKR «Issledovanie vlijaniya rovnosti dorozhnyh pokrytij na velichinu dinamicheskikh nagruzok v dorozhnyh konstrukcijah s razrabotkoj predlozhenij» / Gos. kontrakt № PO 12/429-1, Rostov n/D, 2004. – 150 s.
5. Otchet po teme NIOKR «Razrabotka metoda optimizacii prinimaemyh reshenij pri remonte jekspluatiruemyh avtomobil'nyh dorog na osnove analiza harakteristik dinamicheskogo (vibracionnogo) nagruzenija transportnogo potoka» / Gos. kontrakt № PO 12/442, Rostov n/D, 2007. – 166 s.
6. Konorev, A.S. Metodika ocenki dinamicheskikh peregruzok [Tekst] / E.V. Uglova, D.A. Nikolenko, A.S. Konorev // Izvestija OrelGTU. – Orel: OrelGTU. – 2008. – 82-87 s.

**Konorev Alexander Sergeevich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Younger research assistant  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Nikolenko Denis Aleksandrovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Candidate of technical science, associate professor of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Nikolenko Maxim Aleksandrovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Candidate of technical science, associate professor of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Akulov Vladimir Vladimirovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Undergraduate  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

КОРОВКИН М.О.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА С-3 В ВЯЖУЩЕМ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ

*В статье приводятся результаты исследований эффективности использования суперпластификатора С-3 в вяжущем низкой водопотребности, полученном при совместном помоле клинкера, гипса и суперпластификатора, в сравнении с эффективностью других способов введения добавки в цемент. Исследовано влияние дозировки и способа введения С-3 на водоредуцирующий эффект и прочность для цемента с различной тонкостью помола. Установлено, что совмещение суперпластификатора с цементом при помоле эффективнее введения добавки в виде порошка или с водой затворения только при повышенной дисперсности вяжущего.*

**Ключевые слова:** суперпластификатор, вяжущее низкой водопотребности (ВНВ), водоредуцирующий эффект, прочность.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной прогресс в технологии бетонов за последние 30 лет был достигнут за счет исследования возможностей и практического применения одной из наиболее эффективных групп химических добавок – суперпластификаторов (СП) [1, 2]. В середине восьмидесятых годов прошлого века была разработана технология вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), которые получались за счет совместного измельчения портландцемента и СП [3, 4]. Использование таких вяжущих позволяло производить бетоны с очень низким расходом воды, что обеспечивало значительное повышение прочности и долговечности [1-5].

В отечественном строительном материаловедении сложилось устойчивое мнение [1-4] о том, что производство и применение ВНВ – одно из наиболее эффективных направлений использования СП в бетонах. В литературе, однако, почти отсутствуют сведения о результатах промышленного применения ВНВ. На основании этого факта можно предположить, что закономерности, определяющие свойства и эффективность использования ВНВ, исследованы недостаточно полно. В связи с этим были проведены исследования эффективности введения СП в цемент при помоле в сравнении с другими способами совмещения добавки с цементом.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Было исследовано влияние различных факторов – тонкости помола цемента, количества СП и способа его введения на эффективность СП С-3. Изучались три способа введения добавки: при помоле вяжущего (ВНВ), с водой затворения и в виде сухого порошка при перемешивании сухой растворной смеси. Эффективность способа совмещения СП с цементом оценивалась по изменениям водоредуцирующего эффекта и прочности цементно-песчаного раствора в различные сроки испытания.

При исследованиях эффективности различных способов введения СП определялись зависимость от водоцементного отношения консистенции цементно-песчаного раствора состава 1:2 и его прочность при твердении в нормальных условиях.

Консистенция растворной смеси характеризовалась в эксперименте ее расплывом (РК) на встряхивающем столике по стандартной методике [6]. Для определения расхода воды, необходимого для получения смеси с определенным РК, проводилось несколько опытов, в которых измерялись РК смесей, приготовленных с различными дозировками воды затворения. Анализ зависимостей РК от водоцементного отношения показал, что они достаточно точно аппроксимируются линейным уравнением вида  $RK = a + b (В/Ц)$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, которые находятся по экспериментальным значениям методом наименьших квадратов.

Полученные уравнения использовались для расчета водопотребности смесей с равными распылами смесей на встряхивающем столике. По расчетным значениям вычислялись показатели водоредуцирующего эффекта  $BP = 100 ((B/C)_{н} - (B/C)_{п}) / (B/C)_{н}$ , где  $(B/C)_{н}$  и  $(B/C)_{п}$  – водоцементные отношения составов без добавки и с добавкой СП, соответственно.

Консистенция смеси определялась через 5, 15 и 30 минут после начала перемешивания. Затем из смеси изготавливались образцы размером 20×20×20 мм для определения прочности при сжатии через 1, 3, 7 и 28 суток твердения в нормальных условиях.

Влияние добавки на прочность оценивалось по показателю относительной прочности  $R_{от} = (R_{п}/R_{н}) \cdot 100$ , где  $R_{п}$  и  $R_{н}$  – прочность соответственно пластифицированного и непластифицированного составов, которая вычислялась по формуле  $R = a + b (B/C)$  при расчетных значениях В/Ц для равноподвижных смесей.

Цементы для исследования готовились путем помола цементного клинкера производства ОАО «Мордовцемент» и гипсового камня в количестве 4% от массы вяжущего. Вяжущее измельчалось до удельной поверхности 300, 400 и 450 м<sup>2</sup>/кг. Тонкость помола контролировалась с помощью прибора ПСХ-2.

Для приготовления смеси применялся песок Сурского месторождения с  $M_k=1,54$ . В качестве СП исследовалась добавка С-3 производства ООО «Полипласт Новомосковский».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости ВР и относительной прочности от дозировки СП для различных способов введения добавки приведены на рисунках 1 и 2. Расчеты были произведены для смесей, характеризующихся значениями  $PK=170$  мм.

Сравнивая зависимости водоредуцирующего эффекта при введении СП в цемент с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг, представленные на рисунке 1а, можно отметить, что при дозировке добавки 0,5% совместный помол цемента и С-3 дает несколько более высокий ВР, чем введение добавки с водой затворения или в виде порошка. Однако увеличение ВР незначительно и не приводит, как видно на рисунке 2, а, к повышению прочности цемента через 28 суток твердения. При этом отмечено снижение прочности в возрасте 1 суток при введении СП при помоле и в виде порошка.

При дозировке 1% СП совместный помол, напротив, дает меньшие ВР и прочность в возрасте 28 суток, по сравнению с другими способами введения добавки. На рисунке 1, а видно, что ВР при всех способах введения СП при увеличении сроков определения консистенции смеси до 15 и 30 мин возрастает. Такое повышение ВР объясняется не увеличением пластифицирующего эффекта, а более быстрым снижением РК смеси без добавки СП.

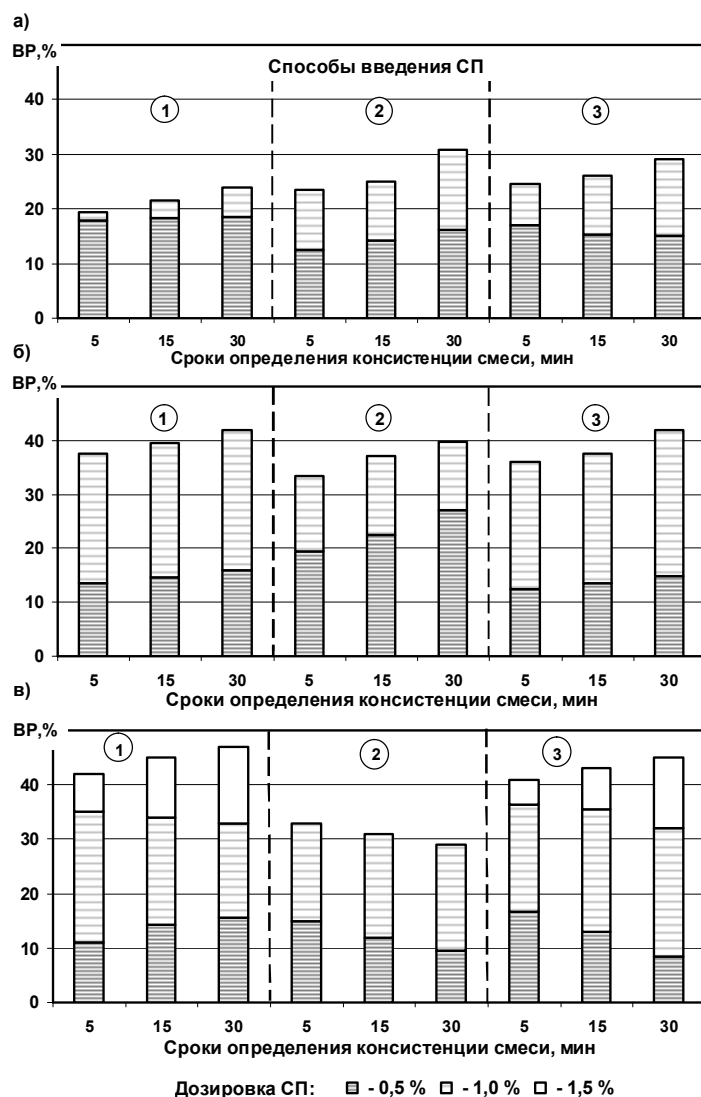
При достижении тонкости помола цемента удельной поверхности 400 м<sup>2</sup>/кг при дозировке С-3 1% наблюдалось повышение водоредуцирующего эффекта для всех способов введения СП до значений 34...42% (рисунок 1, б). Значения относительной прочности через 28 суток твердения в нормальных условиях составили 136...157%. Наибольший прирост прочности наблюдался в составах, в которые СП вводился в виде порошка, наименьший – при совместном помоле цемента и СП (рисунок 2, б). При введении СП в цемент в виде порошка отмечено наименьшее замедление твердения в ранние сроки.

При повышении тонкости помола цемента до удельной поверхности 450 м<sup>2</sup>/кг для всех способов введения добавки при дозировке СП 1% происходит снижение ВР в сравнении с составами, приготовленными на цементе, имеющем удельную поверхность 400 м<sup>2</sup>/кг. Показатели ВР при введении СП в виде порошка и при помоле приблизительно равны и выше, чем при введении добавки с водой затворения.

При использовании 1% С-3 наибольшее повышение прочности через 28 суток твердения в сравнении с контрольным составом (54%) было отмечено для ВНВ. При введении СП в цемент в виде порошка увеличение прочности составило 43%, а с водой затворения – 36%.

При введении в цемент С-3 в виде раствора в количестве 1,5% происходило практически полное блокирование твердения вяжущего до 28 суток включительно, поэтому исследо-

вания свойств цемента при такой дозировке СП были проведены только для двух способов совмещения добавки с цементом.



**Рисунок 1 – Влияние дозировки СП и сроков определения консистенции смеси на водоредуцирующий эффект в цементно-песчаных растворах, приготовленных на цементах с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг (а), 400 м<sup>2</sup>/кг (б) и 450 м<sup>2</sup>/кг (в), при различных способах введения добавки: 1 – при помоле; 2 – с водой затворения; 3 – в виде порошка**

Исследования свойств цементно-песчаного раствора, приготовленного с применением цемента с удельной поверхностью 450 м<sup>2</sup>/кг при дозировке СП 1,5%, показали, что ВР в таких составах достигает 42...47% (рисунок 1в). Прочностные характеристики при введении СП при помоле повышаются на 59% в сравнении с равноподвижным бездобавочным составом, а при введении СП в виде порошка – всего на 38%, несмотря на то что показатели ВР для обоих способов приблизительно равны.

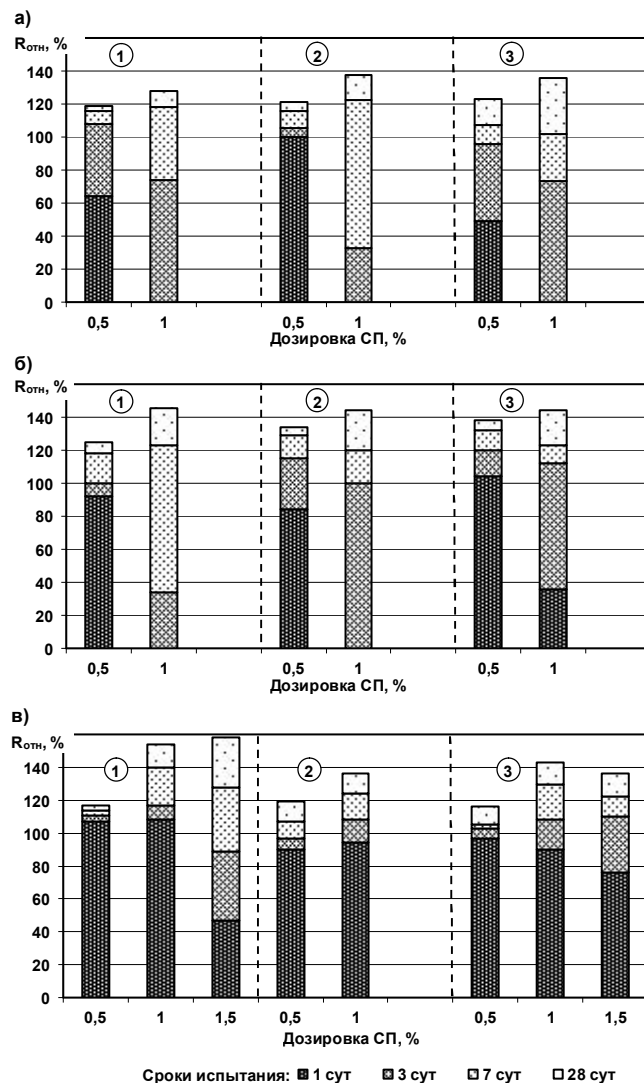
Различия в значениях ВР для исследованных способов совмещения СП и цемента можно объяснить различными условиями сорбции СП на поверхности продуктов гидратации цемента на начальных стадиях.

При введении СП в смесь с водой затворения происходит постепенная сорбция добавки из раствора. При этом большая часть СП адсорбируется на продуктах гидратации алюминатных минералов, так как они имеют сорбционную способность, в несколько раз более высокую, чем силикатные минералы [5].

У ВНВ суперпластификатор сорбируется при растворении добавки, которая распределена тонким слоем на поверхности частиц цемента. Локальная концентрация раствора СП



вблизи поверхности цемента у ВНВ намного выше, чем в случае введения добавки с водой затворения, что приводит к более однородной сорбции СП на различных минералах.



**Рисунок 2 – Влияние дозировки СП на относительную прочность в различные сроки испытания цементно-песчаных растворов, приготовленных на цементах с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  (а),  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$  (б) и  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$  (в), при различных способах введения добавки: 1 – при помоле; 2 – с водой затворения; 3 – в виде порошка**

При введении суперпластификатора в смесь в виде порошка концентрация его раствора повышается в процессе постепенного растворения добавки. При этом создаются условия сорбции, близкие к условиям, возникающим при многостадийном введении добавки, которое используется для повышения ВР и сохранения пластифицирующего эффекта [5].

Изменение условий сорбции влияет и на прочность, особенно в ранние сроки твердения. При высоких дозировках СП возможно заметное снижение конечной прочности цемента. Этим объясняется несоответствие в ряде случаев между значениями ВР и прироста прочности.

### Выводы

Проведенные исследования эффективности различных способов совмещения суперпластификатора с цементами показали, что введение СП при помоле цемента до удельной поверхности  $300 \dots 400 \text{ м}^2/\text{кг}$  не имеет преимуществ по водоредуцирующему эффекту и повышению прочности в сравнении с другими способами введения добавки.

При повышении тонкости измельчения цемента до  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$  использование СП для приготовления ВНВ позволяет достичь значительного возрастания водоредуцирующего эф-

фекта и прочности. При высокой дисперсности цемента его совместное измельчение с СП является наиболее эффективным способом совмещения добавки с цементом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии [Текст] / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всерос. конф. Т. 1. Пленарные докл. – М., С. 91-101.
2. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2007. – 528 с.
3. Батраков, В.Г. Бетоны на вяжущих с низкой водопотребностью [Текст] / В.Г. Батраков, Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков и др. // Бетон и железобетон. – 1988. – №11. – С. 4-6.
4. Бабаев, Ш.Т. Основные принципы получения высокоэффективных вяжущих низкой водопотребности [Текст] / Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков, В.Н. Сердюк // Промышленность строительных материалов. Сер. 3. Промышленность сборного железобетона / ВНИИЭСМ, 1991. – Вып. 1. – 76 с.
5. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст] / В.Г. Батраков. – М., 1998. – 768 с.
6. ГОСТ 310.4-81\*. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 6 с.

#### Коровкин Марк Олимпиевич

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза  
Старший преподаватель и соискатель кафедры «Технология бетонов, керамики и вяжущих»  
Тел.: +7 927 371 69 22  
E-mail: m\_korovkin@mail.ru

KOROVKIN M.O.

### STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF SUPERPLASTICIZER S-3 IN BINDERS WITH A LOW WATER REQUIREMENT

*In the paper the results of efficiency superplasticizer S-3 in the low water binder, obtained under the combined grinding clinker, gypsum and superplasticizer in comparison to other ways of introducing the additive in cement. The effect of dosage and route of administration S-3 for reduce water effect and strength of cement with different fineness. Found that the introducing of superplasticizer in cement by grinding efficiently introducing additives in the form of powder or with mixing water only at a high dispersion of the binder.*

**Keywords:** superplasticizer, binders with a low water requirement (LWB), water-reducing effect, stress.

1. Bazhenov, Ju.M. Novyj vek: novye jeffektivnye betony i tehnologii [Tekst] / Ju.M. Bazhenov, V.R. Falikman // Materialy I Vseros. konf. T. 1. Plenarnye dokl. – М., S. 91-101.
2. Bazhenov, Ju.M. Tehnologija betona [Tekst] / Ju.M. Bazhenov. – М.: ASV, 2007. – 528 s.
3. Batrakov, V.G. Betony na vjazhuwih s nizkoj wodopotrebnost'ju [Tekst] / V.G. Batrakov, Sh.T. Babaev, N.F. Bashlykov i dr. // Beton i zhelezobeton. – 1988. – №11. – S. 4-6.
4. Babaev, Sh.T. Osnovnye principy poluchenija vysokojeffektivnyh vjazhuwih nizkoj wodopotrebnosti [Tekst] / Sh.T. Babaev, N.F. Bashlykov, V.N. Serdjuk // Promyshlennost' stroitel'nyh materialov. Ser. 3. Promyshlennost' sbornogo zhelezobetona / VNIIEСM, 1991. – Vyp. 1. – 76 s.
5. Batrakov, V.G. Modificirovannye betony. Teorija i praktika [Tekst] / V.G. Batrakov. – М., 1998. – 768 s.
6. GOST 310.4-81\*. Cementy. Metody opredelenija predela prochnosti pri izgibe i szhatii. – М.: Izd-vo standartov, 1994. – 6 s.

#### Korovkin Mark Olimpievich

Penza state university of architecture and building, Penza  
Senior teacher and the competitor of department «Technology of concrete, ceramics and knitting»  
Ph.: +7 927 371 69 22  
E-mail: m\_korovkin@mail.ru

МИЗОНОВ В.В., ЛЯПИН А.А., ИЛИОПолов С.К.,  
УГЛОВА Е.В., ТИРАТУРЯН А.Н.

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗНАЧЕНИЙ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ СЛОЕВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В ходе проведенных исследований разработан программный комплекс для анализа динамического напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции Vibrolab, базирующийся на аналитической модели многослойного полупространства «дорожная конструкция – грунт». Разработаны устойчивые схемы решения обратной задачи об определении модулей упругости слоев дорожной конструкции на стадии эксплуатации. На основе экспериментальных исследований состояния эксплуатируемых дорожных конструкций приведен расчет эксплуатационных значений модулей упругости конструктивных элементов дорожной одежды.*

**Ключевые слова:** обратная задача, напряженно-деформированное состояние, модуль упругости.

Автомобильные дороги работают в сложных условиях воздействия на них как агрессивных природных факторов, так и резко возросшего уровня движения грузовых автомобилей, с нагрузками значительно превышающими нормативные. В РФ средний срок между сдачей дороги в эксплуатацию и капитальным ремонтом составляет примерно 10-12 лет, а за рубежом аналогичный срок службы покрытий достигает 16-18 лет. Продление срока службы дорожных конструкций возможно достичь путем рационального выбора стратегии дорожно-ремонтных работ, опирающегося на данные диагностики дорожной одежды.

Одной из важнейших задач современной диагностики дорожных конструкций является определение фактических модулей упругости элементов дорожной одежды на стадии эксплуатации методом неразрушающего контроля. На данный момент в РФ отсутствуют эффективные экспериментальные методы, которые позволяли бы решить данную задачу, а применение такого показателя как общий модуль упругости неинформативно с точки зрения оценки динамических процессов, протекающих в дорожных конструкциях при движении автомобильного транспорта. Реально диагностировать состояние дорожных конструкций на стадии эксплуатации возможно лишь с применением методов современного математического аппарата механики твердого деформируемого тела. В последнее время значительное развитие в механике получил новый класс задач, названных обратными.

Данный класс задач отличается от прямых по характеру причинно – следственной связи. Если для прямых задач известны причины (начальные условия для модели, граничные условия, область занятая изучаемым объектом), а требуется найти следствие (перемещения, напряжения, деформации, температура), то для обратных задач ситуация иная. Известно следствие, а причину требуется найти по некоторой дополнительной информации, т.е. по сути, осуществить обращение причинно-следственных связей.

К настоящему времени сложилась следующая условная классификация обратных задач [1]:

- ретроспективные обратные задачи (задачи с обращенным временем) – задачи об определении начального состояния объекта исследования по некоторым функционалам или операторам от решения;
- коэффициентные обратные задачи – задачи об определении коэффициентов дифференциальных операторов;
- граничные обратные задачи (задачи об определении граничных условий);

- геометрические обратные задачи (задачи об определении области занятой объектом исследования);

- обратные задачи смешанных типов (задачи с неизвестными нескольких типов, например коэффициенты дифференциальных операторов и область занятая объектом исследования).

Область применения обратных задач в дорожной практике постепенно расширяется, и в целом можно выделить следующие основные направления:

- определение толщин слоев дорожной конструкции с применением георадиолокационных устройств;

- проведение неразрушающего контроля (определение механических, теплофизических свойств материалов);

- определение расположения и конфигурации дефекта по измеренному полю упругих смещений на поверхности тела или по резонансным частотам).

Методики определения таких механических показателей как модуль упругости или плотность материала основываются, как правило, на способах решения обратных коэффициентных задач.

Большое внимание разработке новых и совершенствованию существующих способов неразрушающего контроля дорожных одежд уделяется за рубежом. При этом следует отметить что основываются эти способы на методах линейно-упругого анализа напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций.

Для анализа напряженно-деформированного состояния дорожной одежды в мировой практике разработаны механико-математические модели дорожной конструкции, основывающиеся на решении прямой задачи об определении напряжений и деформаций в многослойной среде при приложении нагрузки, предложенном Бурмистером [2] в 1943 г, и развитым такими учеными как Асум, Fox, Schiffman [3, 4].

Решение предложенное Бурмистером базировалось на следующих гипотезах:

- каждый слой состоит из изотропного линейно-упругого материала и ограничен лишь двумя параллельными плоскостями (кроме нижнего, ограниченного одной плоскостью и имеющего бесконечную толщину);

- все слои сцеплены между собой или имеют гладкие контакты;

- на горизонтальную поверхность слоистого полупространства действует нормальная нагрузка, симметричная относительно вертикальной оси.

На решении Бурмистера основываются такие программные комплексы анализа напряженно-деформированного состояния как: MMOPP (Mathematical model of pavement performance), CHEVRON, ELSYMS, BISTRO, BISAR, MultiSmart3D.

Для оценки состояния дорожной конструкции на стадии эксплуатации в зарубежной практике применяются установки динамического нагружения FWD (falling weight deflectometer), позволяющие регистрировать вертикальные перемещения поверхности дорожной одежды на расстоянии до 1,5 м от точки ударного воздействия. Обработка данных, полученных в ходе эксперимента, осуществляется в программных комплексах ModComp-3, Wesdef, EverCalc, Elmod, основанных на алгоритмах решения обратных коэффициентных задач об определении модулей упругости.

Восстановление эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды осуществляется таким образом, чтобы смещения точек покрытия, рассчитанные по модели, имели наименьшее отклонение от замеренных в полевых условиях величин.

В РГСУ под руководством профессора Ляпина А.А. была разработана механико-математическая модель многослойного полупространства «дорожная конструкция - грунт», основывающаяся на решениях динамической теории упругости и вязкоупругости (рисунок 1).

На основе данной модели был разработан программный комплекс для анализа динамического напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции при ударном воздействии Vibrolab, позволяющий осуществлять расчет динамических модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации по данным натурных испытаний с использованием установки ударного нагружения.

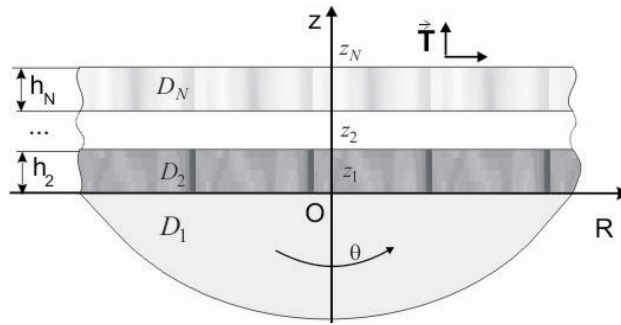


Рисунок 1 – Механико-математическая модель многослойного полупространства «дорожная конструкция – грунт»

Входными данными для анализа динамического НДС дорожной конструкции являются:

- величины модулей упругости, плотностей, коэффициентов Пуассона для материала слоев дорожной одежды (принимаемые в соответствии с ОДН 218.046-01 [5]);
- экспериментальная чаша динамических прогибов поверхности дорожной конструкции;
- данные о динамической нагрузке, задаваемой экспериментальными установками.

Для динамического нагружения дорожной конструкции использовалась малогабаритная установка ударного нагружения, разработанная в РГСУ, а чаша динамических прогибов дорожной конструкции регистрировалась датчиками акселерометрами, установленными параллельно оси дороги по полосе наката на расстоянии 0,25; 0,75; 1,25; 2,5 м от места ударного воздействия [6].

Особенно важным при решении обратных задач является вопрос устойчивости решения. Решение считается устойчивым в том случае если при малом изменении входных данных для расчета, изменение результатов расчета будет также мало. Неустойчивость решения характерна для всех типов обратных задач, т.к. они противоречат по своей сути критериям корректности которые впервые были сформулированы Ж. Адамаром [1]. В соответствии с ними задача считается корректно поставленной если:

- для задачи существует решение;
- решение единственно;
- решение непрерывно зависит от данных задачи.

Для достижения устойчивости решения в программном комплексе Vibrolab были реализованы две схемы корректировки расчетных и экспериментальных перемещений поверхности дорожной конструкции: схема последовательной корректировки, и метод первого порядка.

При процедуре последовательной корректировки число параметров (модулей упругости слоев) должно соответствовать количеству точек регистрации чаши максимальных динамических прогибов. В силу различного влияния изменения модуля упругости на геометрию чаши максимальных прогибов процедуру корректировки целесообразно начинать с корректировки модуля упругости грунта земляного полотна по датчикам, расположенным на расстоянии 1,5-2,5 м. Далее путем варьирования модуля упругости слоя основания с заданной точностью достигается соответствие экспериментальной и расчетной чаш максимальных динамических прогибов в точке, удаленной от места ударного воздействия на расстоянии 0,75-1,5 м. На последнем этапе происходит корректировка модуля упругости асфальтобетона путем сопоставления максимальных динамических прогибов в наиболее близкой к источнику ударного воздействия зоне (0,25-0,75 м). Процесс корректировки продолжается до тех пор пока погрешность между экспериментальными и расчетными значениями вертикальных перемещений точек поверхности дорожной конструкции не будет меньше заданной пользователем величины (в данном примере 5%).

Зоны, характеризующие состояние слоев дорожной конструкции, выбирались исходя из масштабного численного эксперимента, проведенного с использованием механико-математических моделей разного уровня [7].

Метод первого порядка основывается на следующем алгоритме:

1. Численно находим  $\frac{\partial U_y(x_k^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)})}{\partial E_j}$ ,  $j = 1, 2, 3$ , по расчетной чаше максималь-

ных динамических прогибов при проектных значениях  $E_j = E_j^{(0)}$ ,

где  $U_y(x_k^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)})$  – функция перемещения от координат точек установки датчиков  $x_k$ , и модулей упругости слоев дорожной конструкции  $E_1, E_2, E_3$ .

2. Сопоставляем эти величины с полученными на основе обработки экспериментальных данных. Выявляем на основе этого сопоставления точки  $x = x_k^{(0)}$ , в которых имеет место максимальное их расхождение. Число точек должно совпадать с числом определяемых параметров (в данном случае  $k = 1, 2, 3$ ).

3. Определяем главные члены разложения левой части уравнения (1) – расчетной чаши максимальных динамических прогибов по приращению неизвестных параметров:

$$U_y(x, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)}) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial U_y(x, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)})}{\partial E_j^{(0)}} \Delta E_j$$

и требуем равенства этого выражения в узлах  $x = x_k$  величинам максимального динамического прогиба в соответствующих точках, полученным экспериментально. В результате получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений для определения  $\Delta E_j$ :

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial U_y(x_k^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)})}{\partial E_j^{(0)}} \Delta E_j = \phi(x) - U_y(x_k^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)}), k = 1, 2, 3,$$

где  $\phi(x)$  – заданная форма чаши динамических прогибов дорожной конструкции, полученная из экспериментальных данных.

По полученным в результате решения системы (2) величинам  $\Delta E_j$  получаем первое приближение значений искомых модулей упругости:

$$E_j^{(1)} = E_j^{(0)} + \Delta E_j$$

4. Проводим расчет чаши максимальных динамических прогибов для полученных значений  $E_j^{(1)}$ , и повторяем процедуры пунктов 1, 2, 3 до достижения требуемой точности.

Предложенные схемы корректировки были апробированы при расчете фактических значений модулей упругости элементов дорожной конструкции для участка автомобильной дороги М4 «Дон» на километре 1094+000.

Данная конструкция была смоделирована в программном комплексе Vibrolab, при этом асфальтобетонные слои объединялись в один слой покрытия, а слои из несвязных материалов в слой основания со средневзвешенными модулями упругости. Расчетные параметры модели дорожной конструкции приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики дорожной конструкции

Расчетные характеристики	Элементы дорожной конструкции		
	Покрытие	Основание	Грунт земляного полотна
Модуль упругости ( $E$ ), МПа	2500	350	46
Плотность ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>	2350	1600	2000
Коэффициент Пуассона ( $\nu$ )	0,35	0,3	0,35
Толщина ( $h$ ), м	0,14	0,35	$\infty$

По данным экспериментальных замеров чаши динамических прогибов, проведенных с использованием малогабаритной установки ударного нагружения, было произведено сопоставление экспериментальных и расчетных чаш динамических прогибов поверхности дорож-

ной конструкции (рисунок 2, 3). Результаты вычисления эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации приведены на рисунке 4:

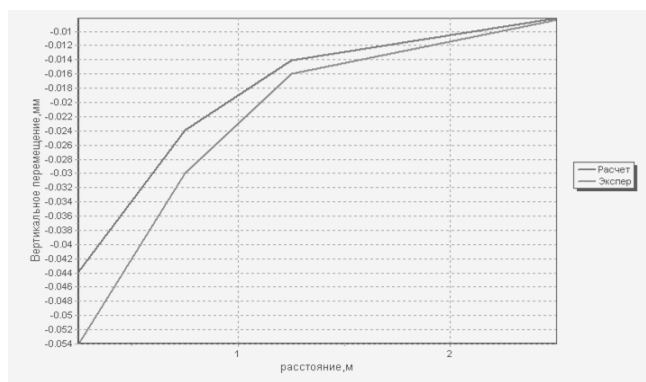


Рисунок 2 – Расчетная и экспериментальная чаши динамических прогибов (до корректировки)

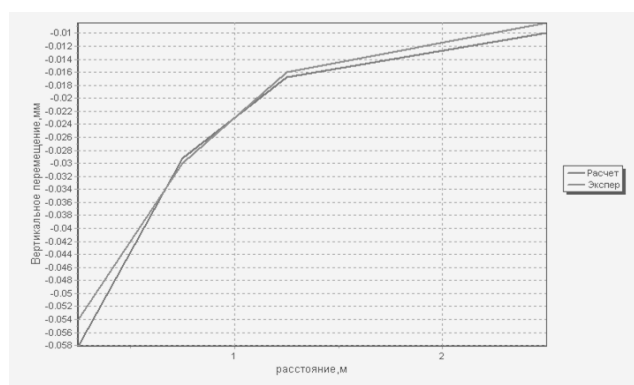


Рисунок 3 – Расчетная и экспериментальная чаши максимальных динамических прогибов (после корректировки)

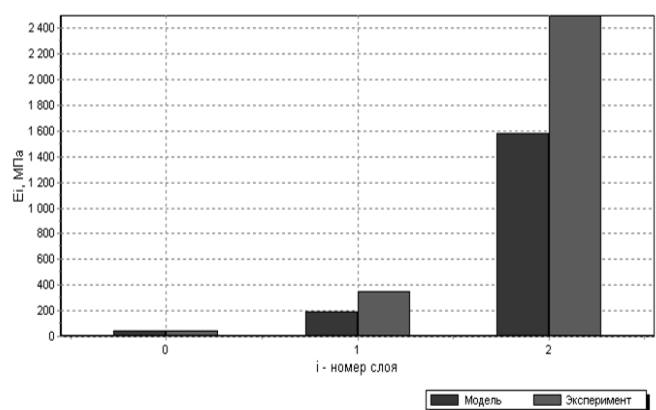


Рисунок 4 – Расчетные величины модулей упругости элементов дорожной одежды на стадии эксплуатации

В данном примере для определения эксплуатационных значений модулей упругости элементов дорожной конструкции применялся метод последовательной корректировки. Расчет модулей упругости методом первого порядка показал такие же результаты.

Следует отметить значительное снижение модулей упругости слоев покрытия и основания, что свидетельствует о серьезной потере несущей способности дорожной конструкции.

Данные, полученные с помощью расчета в программном комплексе Vibrolab, подтверждаются результатами визуальной оценки и лабораторных испытаний материалов слоев дорожной конструкции, отобранных в виде проб на км 1094+000 автомобильной дороги М-4 «Дон».

### Выводы

1) Разработана аналитическая модель многослойного полупространства «дорожная конструкция – грунт», позволяющая проводить анализ динамического напряженно-деформированного состояния дорожной одежды.

2) Разработаны устойчивые схемы корректировки величин модулей упругости элементов дорожной конструкции на стадии эксплуатации.

3) Разработан программный комплекс Vibrolab, базирующийся на аналитической модели напряженно-деформированного состояния системы «дорожная конструкция – грунт», и позволяющий рассчитывать эксплуатационные значения динамических модулей упругости элементов дорожной одежды.

4) Апробирован способ расчета динамических модулей упругости слоев дорожной конструкции для участка эксплуатируемой автомобильной дороги. Величины модулей упругости, полученные расчетным путем согласуются с данными лабораторных испытаний отобранных проб материала слоев дорожной одежды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватульян, А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела [Текст] / А.О. Ватульян. – М.: ФизМатЛит, 2007 – 224 с.
2. Burmister, D.M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems / D.M. Burmister // Journal of Applied Physics, Vol. 16, pps. 89-94, 126-127, 296-302. – 1945.
3. Acum, W.A, Fox, L. Computation of Load Stresses in a Three-Layer Elastic System / W.A. Acum, L. Fox // Geotechnique, Vol.2, pp. 293-300. – 1951.
4. Schiffman, R.L. (1962). General Solution of Stresses and Displacements in Layered Elastic Systems, Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
5. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст] (взамен ВСН 46-83).
6. Лобов, Д.В. Спектральный анализ волновых полей в конструкциях дорожных одежд нежесткого типа: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук [Текст] / Д.В. Лобов – М.: 2004.
7. Углова, Е.В. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий [Текст] / Е.В. Углова, С.К. Илиополов, М.Г. Селезнев. – Ростов-на-Дону, РГСУ, 2009 – 244 с.

#### Мизонов Валентин Владимирович

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Ассистент кафедры «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### Ляпин Александр Александрович

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы в строительстве»  
Тел.: +7 (863) 227-75-62

#### Илиополов Сергей Константинович

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-11-43  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### Углова Евгения Владимировна

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### Тиратуриян Артем Николаевич

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Магистр кафедры «Автомобильные дороги»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru



MIZONOV V.V., LJAPIN A.A., ILIPOLOV S.K.,  
UGLOVA E.V., TIRATURJAN A.N.

## RETURN PROBLEM ABOUT DEFINITION OF VALUES OF MODULES OF ELASTICITY OF LAYERS OF MAINTAINED ROAD DESIGNS

*In the course of the research has developed a software package for analysis of the dynamic stress-strain state of the road construction Vibrolab, based on analytical models of multi-layered half-space of the road construction - ground. " Developed robust scheme for solving the inverse problem of determining the elastic moduli of the layers of road construction during the operation. Based on experimental studies of the condition of exploited road constructions operating results of the calculation of values of elastic moduli of structural elements of the pavement.*

**Keywords:** reverse task, intense-deformed states, resilient modulus.

### BIBLIOGRAPHY

1. Vatul'jan, A.O. Obratnye zadachi v mehanike deformiruемого твердого тела [Tekst] / A.O. Vatul'jan. – M.: Fiz-MatLit, 2007 – 224 s.
2. Burmister, D.M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems / D.M. Burmister // Journal of Applied Physics, Vol. 16, pps. 89-94, 126-127, 296-302. – 1945.
3. Acum, W.A, Fox, L. Computation of Load Stresses in a Three-Layer Elastic System / W.A. Acum, L. Fox // Geotechnique, Vol.2, pp. 293-300. – 1951.
4. Schiffman, R.L. (1962). General Solution of Stresses and Displacements in Layered Elastic Systems, Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
5. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd [Tekst] (vzamen VSN 46-83).
6. Lobov, D.V. Spektral'nyj analiz volnovyh polej v konstrukcijah dorozhnyh odezhd nezhestkogo ti-pa: dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk [Tekst] / D.V. Lobov – M.: 2004.
7. Uglova, E.V. Ustalostnaja dolgovechnost' jekspluatiruemyh asfal'tobetonyh pokrytij [Tekst] / E.V. Uglova, S.K. Iliopolov, M.G. Seleznev. – Rostov-na-Donu, RGSU, 2009 – 244 s.

#### **Mizonov Valentine Vladimirovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
assistant of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### **Lyapin Alexander Aleksandrovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of department «Information systems in building»  
Ph.: +7(863) 227-75-62

#### **Iliopolov Sergey Konstantinovich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Doctor of technical science, professor, head of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-11-43  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### **Uglova Evgenie Vladimirovna**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
Doctor of technical science, professor of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

#### **Tiraturjan Artem Nikolaevich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu  
The master of department «Highway»  
Ph.: +7(863) 263-77-76  
E-mail: dortransnii@mail.ru

ФЕДОСОВ С.В., РУМЯНЦЕВА В.Е., ФЕДОСОВА Н.Л., РУМЯНЦЕВА К.Е.

## АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*В данной работе представлена оценка существующих на сегодняшний день методов защиты строительных конструкций от коррозионных воздействий агрессивных сред, проведен анализ существующих физических, химических и электрохимических методов нанесения покрытий на металлических изделиях, предъявляемые к защитным и специальным покрытиям на металлических изделиях. Особое внимание уделено электрохимическому и химическому способам нанесения покрытий на различные металлы и сплавы. Обоснована возможность и целесообразность формирования на защищаемых от коррозии поверхностях конверсионных слоев, в частности, с использованием процесса холодного фосфатирования стальной арматуры в железобетонных конструкциях.*

*Ключевые слова:* коррозия, гальванические покрытия, строительные конструкции, металлические сплавы, цинкование, фосфатирование, защита арматуры.

Огромный экономический и экологический ущерб от коррозии в строительной отрасли связан с большой металлоемкостью сооружений и технологического оборудования, подвергающимся разрушительному действию агрессивных сред. Общие прямые убытки от коррозии исчисляются десятками миллиардов рублей, за год в результате коррозии примерно 30% изделий из металлов и сплавов приходят в негодность и направляются на переплавку. Причем в эту сумму не входят ни стоимость ремонтных работ, ни потери, связанные с простоем производства из-за преждевременного выхода конструкций из строя, ни стоимостная оценка аварийных случаев. Организации планомерной и эффективной борьбы с коррозией, повышающей долговечность сооружений и оборудования, безаварийность производства, увеличивающая межремонтные периоды, – одно из основных условий повышения эффективности капиталовложений [1].

Применение металлических сплавов в строительных объектах осложняется рядом условий, которые в значительной мере могут отрицательно повлиять на безопасную службу конструкций. Это, прежде всего, – накопление электролита в застойных и щелевых зонах, наличие опасных контактов с другими металлами и материалами, возникновение при эксплуатации нагрузок различного происхождения (снеговых, ветровых, конструкционных напряжений и т.д.), воздействие расположенных рядом экстремально агрессивных производств и многие другие факторы, влияние которых не всегда можно учесть. В напряженных конструкциях положение усложняется необходимостью учитывать структурные неоднородности, возникающие в результате сварки, и характер постоянно действующих нагрузок.

Наиболее надежный метод борьбы с коррозией – изготовление машин, аппаратов и другого оборудования из коррозионностойких материалов [2]. Однако его не всегда можно использовать в силу экономических, технических и других соображений, например, виду того, что коррозионностойкие материалы имеют низкую пластичность и большую стоимость. На практике большинство конструкций и изделий производят из доступных материалов с последующей защитой их от коррозии.

Разрушение материалов и оборудования из металлов и сплавов можно резко снизить, применяя различные методы защиты от коррозии, а именно: снижение агрессивности коррозионной среды с помощью ингибиторов, нанесение защитных металлических и неметаллических (полимерных, лакокрасочных, резиновых) покрытий, анодная и катодная защиты. Гальванические покрытия являются одним из самых распространенных и эффективных методов защиты от коррозии, они также широко применяются для придания поверхности деталей ряда ценных свойств: повышенной твердости и износостойкости, улучшенных антифрикционных свойств, поверхностной электропроводности, высокой отражательной способности, облегчения паяемости и, наконец, просто для улучшения внешнего вида изделий и конструкций в целом [3, 4].

Основы безотказной работы строительных конструкций и оборудования в значительной мере закладываются на стадии проектирования противокоррозионных мероприятий по их защите. В такие мероприятия входит правильный обоснованный выбор рационального способа изготовления металлоконструкции в противокоррозионном отношении: чтобы не было мест для скопления влаги, было меньше щелей, зазоров, нежелательных контактов металлов и механических напряжений. При соединении узлов металлоконструкций следует отдавать предпочтение сварным соединениям перед клепаными и болтовыми.

Стоимость защиты металлоконструкций, осуществляемой на заводах-изготовителях, ниже, чем в условиях строительных площадок, а качество покрытий достаточно высоко, поскольку их нанесение осуществляется по отработанным технологиям в потоке и не зависит от влияния побочных факторов. Поэтому целесообразным является использование в строительстве конструкций с готовыми защитными покрытиями, выполненными в заводских условиях.

Существуют различные методы нанесения покрытий: «горячий», диффузионный, металлизационный, механотермический, химический, гальванический и многие другие [5-13].

«Горячий» метод заключается в погружении изделий в расплавленный металл и диффузии металла в основу с образованием промежуточного сплава, который и обеспечивает хорошую прочность сцепления с основой. Основным преимуществом этого метода является его простота и большая производительность, а недостатком – трудность регулирования толщины покрытия. В промышленной практике наиболее широкое применение получило «горячее» цинкование и оловянирование [5].

Диффузионный метод отличается от метода погружения в расплавленный металл тем, что покрываемые детали приводят в контакт с порошкообразным металлом при температуре ниже его температуры плавления. В этом случае также происходит диффузия металла покрытия в металл основы. Диффузионный метод нашел применение при алюминировании стальных деталей для защиты их от коррозии при высоких температурах [6].

Металлизация представляет собой распыление расплавленного металла и осуществляется с помощью сжатого воздуха или инертного газа из специальных аппаратов-пистолетов. Для улучшения сцепления поверхность основного металла делают шероховатой (например, с помощью гидropескоструйной обработки поверхности). Основным преимуществом этого метода является возможность его использования при покрытии крупногабаритных конструкций: ферм железнодорожных мостов, опор электропередач, водонапорных баков, а недостатком – пористость получаемых покрытий [7].

Механотермический метод (плакирование) применяется для изготовления различных полуфабрикатов (листов, ленты). С этой целью лист из основного металла закладывают между двумя листами из металла покрытия и прокатывают между горячими вальцами под определенным давлением. В результате прокатки получается биметалл. Промышленность выпускает различные виды биметалла: сталь – латунь, алюминиевые сплавы – алюминий, медные сплавы – золото и некоторые другие [9].

Весьма широко применяются контактный и химический методы нанесения покрытий. При контактном методе осаждение происходит за счет работы короткозамкнутого элемента, в котором более электроотрицательный металл (например, цинк или алюминий) растворяется, а на более электроположительном металле (медь или медные сплавы) осаждается покрытие. Этот способ применим при нанесении тонкого покрытия на мелкие и неответственные детали, требующие в основном временной защиты от коррозии.

Сущность химического способа заключается в восстановлении ионов металла из водных растворов с помощью сильного восстановителя. Широкое промышленное применение находит способ химического восстановления никеля, меди, серебра. В качестве восстановителей для восстановления никеля применяют гипофосфит, для восстановления меди – формалин, для восстановления серебра – пирогаллол. Преимущества химического метода заключаются в возможности нанесения гальванических покрытий не только на металлические, но и на неметаллические (пластмассы, стекло, керамика) основы, а также в обеспечении высокой равномерности покрытия во всех точках детали [5, 9].

Электрохимический метод нанесения покрытий имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Гальванические покрытия характеризуются хорошими физико-химическими и механическими свойствами: повышенной твердостью и износостойкостью, малой пористостью, высокой коррозионной стойкостью. Покрытия получают блестящими в процессе электролиза. При гальваническом методе имеется возможность точно регулировать толщину покрытия. Это особенно важно в целях экономии цветных, драгоценных и редких металлов. Наконец, при электролизе водных растворов можно нанести покрытие таких металлов и сплавов, которые другими способами получить не удастся [10]. Защитное покрытие должно иметь минимальную пористость, высокую адгезию к металлу (основе), равномерно распределяться по всей поверхности и придавать поверхности изделия более высокую устойчивость к коррозии, твердость, износостойкость и жаростойкость. Одной из основных задач гальванического покрытия является защита основы от коррозии. В зависимости от характера защиты основы различают анодные и катодные покрытия. Если в определенной коррозионной среде металл покрытия имеет более отрицательный потенциал, чем металл основы, то растворяется покрытие, а не основа. Такое покрытие называется анодным. Если покрытие имеет более положительный потенциал, то растворяется основа – покрытие катодное [11].

Например, по отношению к железу и железуглеродистым сплавам анодным покрытием в атмосферных условиях является цинковое, так как в короткозамкнутом элементе железо – цинк растворимым электродом является цинк. Если на каком-либо участке поверхности покрытие будет повреждено, то при наличии влаги в месте повреждения образуется короткозамкнутый гальванический элемент, в котором оба электрода соединяются непосредственно (накоротко), а электролитом служит водный раствор солей, содержащихся в атмосферной влаге. В этом случае цинк, имеющий стандартный потенциал  $-0,763\text{ В}$ , будет растворяться с образованием ионов цинка  $\text{Zn}^{2+}$ , а на железе ( $-0,440\text{ В}$ ) будут разряжаться ионы водорода, при этом железо разрушаться не будет. На этом и основано широкое применение цинковых покрытий для защиты стальных изделий от коррозии. Другой процесс происходит при наличии поврежденных участков или пор в оловянном покрытии на железе. Поскольку потенциал железа будет электроотрицательнее потенциала олова, то в образовавшемся гальваническом элементе железо будет растворяться с образованием ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , а на олове будут разряжаться ионы водорода  $\text{H}^+$ . Таким образом, железо на этих участках будет разрушаться. Оловянное покрытие в этих условиях будет являться катодным покрытием и защищать от коррозии железо только при отсутствии в покрытии пор и трещин.

Катодными покрытиями являются также покрытия из меди, никеля, хрома, свинца, благородных металлов. Необходимо отметить, что анодный или катодный характер защиты зависит от среды, в которой находится покрываемое изделие. Приведенный выше пример относится к наиболее простому и часто встречающемуся случаю, когда промышленные изделия эксплуатируются в обычных атмосферных условиях (конденсация водяных паров на поверхности изделий или выпадение атмосферных осадков) [10,11].

Изменение условий эксплуатации изделий влечет за собой изменение характера защиты. Так, например, цинковое покрытие перестает защищать железо от коррозии в горячей воде, так как потенциал цинка становится более положительным. И наоборот, оловянное покрытие, которое в атмосферных условиях является катодным, становится анодным без доступа воздуха и в присутствии органических кислот (консервная жесть). Потенциал олова в этих условиях смещается в сторону отрицательных значений. Анодные покрытия обладают лучшими защитными свойствами по сравнению с катодными. Однако применение анодных покрытий ограничивается тем, что они не могут быть использованы без дополнительной защиты, когда предъявляются определенные требования к товарному виду изделий. В том случае, когда образование продуктов коррозии на поверхности деталей нарушает работу приборов, анодные покрытия также неприменимы.

При катодном характере защиты покрытий последние должны полностью изолировать металл изделия от окружающей среды. Это может быть реализовано только при отсутствии пор в осадках. Например, хромирование обеспечивает деталям высокую износоустойчивость благодаря высокой твердости и низкому коэффициенту трения хрома, а также химическую

стойкость из-за его способности сильно пассивироваться и приобретать свойства благородных металлов. Однако хромовые покрытия отличаются пористостью и не защищают железоуглеродистые сплавы от коррозии, так как в гальванической паре железо-хром последний является катодом. Повышение защитных свойств может быть получено за счет применения многослойных покрытий. Например, в процессах никелирования и хромирования широко применяются различные схемы многослойных покрытий (двухслойных: медь – никель, никель – никель, никель – хром, трехслойных: медь – никель – хром, никель – никель – хром и другие) [12].

Повышенная коррозионная стойкость двухслойных и трехслойных покрытий объясняется, прежде всего, меньшей суммарной пористостью покрытий, так как поры одного слоя не совпадают с порами другого слоя, т.е. взаимно перекрываются, а также различием электродных потенциалов отдельных слоев.

Кроме защитных и защитно-декоративных покрытий, применяются специальные покрытия, придающие поверхности изделия определенные свойства: износостойкость, твердость, электрическую проводимость, паяемость, магнитные свойства и др.

Необходимо отметить, что один и тот же вид покрытий может применяться для различных целей. Так, например, хромовое покрытие можно применять не только как защитно-декоративное, но и для повышения твердости и износостойкости; кадмиевые покрытия используют не только для защиты от коррозии в атмосфере морского тумана, но и для обеспечения хорошей свинчиваемости и герметичности резьбовых деталей.

В таблице 1 приводятся краткие сведения об использовании гальванических покрытий для защитных, защитно-декоративных и специальных целей [12].

Таблица 1 – Выбор защитных и специальных покрытий

Назначение покрытия	Металл основы	Вид покрытия
Защита от атмосферной коррозии	Сталь	Цинкование, кадмирование, оксидирование
	Алюминий и его сплавы	Анодное окисление металла
	Цинковые сплавы	Хромирование
	Медь и ее сплавы	Никелирование
Защитно-декоративная отделка	Сталь медь и ее сплавы цинковые сплавы	Защитно-декоративное никелирование, хромирование
	Алюминий и его сплавы	Анодное окисление металла с последующим окрашиванием
Защита от механического износа трущихся поверхностей	Сталь, чугун	Хромирование, химическое никелирование
Восстановление размеров	Сталь, чугун	Хромирование, железнение
Защита от цементации	Сталь	Меднение
Защита от азотирования	Сталь	Оловянирование
Защита от действия серной кислоты	Сталь	Свинцевание
Обеспечение легкости пайки	Сталь, медные сплавы	Оловянирование, осаждение сплавов олово-свинец, олово-висмут, олово-никель
Повышение поверхностной электропроводности	Медные сплавы	Серебрение
Защита от коррозии деталей ответственных приборов	Сплавы меди	Золочение, палладирование, родирование, платинирование
Защитно-декоративная отделка ювелирных изделий	Серебро	Золочение
Обеспечение прочности сцепления металла с резиной при горячем прессовании	Сталь	Латунирование
Повышение антифрикционных свойств		Осаждение сплавов серебра, сплавов свинца и индия
Повышение отражательной способности	Сталь, латунь	Хромирование, серебрение, родирование
Защита от коррозии консервной тары	Сталь	Оловянирование
Подготовка поверхности под лакировку и окраску		Фосфатирование
Нанесение магнито-мягких покрытий	Медь, бронза	Осаждение сплава никель-железо
Нанесение магнито-твердых покрытий	Медные сплавы	Осаждение сплавов никель-кобальт, никель-фосфор, никель-кобальт-фосфор

В группу конверсионных покрытий входят покрытия, которые не наносятся извне на поверхность изделий, а формируются в результате конверсии (превращения) при взаимодействии металла с рабочим раствором, так что ионы металла входят в структуру покрытия. Это прочные солевые или оксидные пленки, чаще всего фосфатные и оксидные, которые образуются на поверхности черных и цветных металлов в процессе их химической или электрохимической обработки. В зависимости от условий ведения процесса, получаемые пленки могут обладать высокой адсорбционной способностью, электроизоляционными свойствами, повышенной твердостью и износостойкостью и т.д. При условии их дополнительной обработки путем наполнения пассивирующими растворами или пропитки смазочными материалами неорганические пленки повышают коррозионную стойкость металлов и сплавов.

Фосфатные покрытия представляют собой пленку труднорастворимых в воде фосфорнокислых соединений, образовавшихся в результате взаимодействия металла с фосфорной кислотой и ее кислыми солями [8, 13]. Защитная способность их по стали выше, чем оксидных покрытий, полученных химическим путем, а после пропитки лаками или другими полимерными материалами становится сопоставимой с защитой, достигаемой с помощью гальванических покрытий.

Одним из способов торможения коррозионного процесса стальной арматуры в железобетонных конструкциях является получение на ее поверхности защитного оксидного или фосфатного покрытия, которое бы изолировало ее от воздействия агрессивных веществ. Химическому фосфатированию могут подвергаться углеродистые, низколегированные и среднелегированные стали, чугун, алюминиевые и магниевые сплавы, цинковые и кадмиевые покрытия.

Изучаются возможности процесса низкотемпературного фосфатирования, и по мнению авторов, наиболее перспективным является создание на стали фосфатной пленки из растворов холодного фосфатирования, по целому ряду причин: покрываемое изделие не требует подготовительных работ (обезжиривания, травления, активации и т.д.); растворы не содержат вредных и экологически опасных веществ; ведение процесса при комнатной температуре уменьшает энергозатраты; снижается наводороживание стали; обеспечивается формирование мелкокристаллической пленки [14-16].

Алюминиевые сплавы широко применяются в строительных конструкциях для различного рода ограждающих систем (кровля, стены, перегородки, облицовка, каркасы, рамы, двери). В большей степени используются прессованные профили и панели из сплава АД31, а также листового материала из сплавов типа АМг0.5, АМг2 [17, 18]. Значительная часть этих конструкций защищена анодированием – анодным электрохимическим оксидированием, в результате проведения которого на алюминиевых сплавах образуется толстый оксидный слой, обладающий отличными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [19, 20].

Современные представления о термодинамике и кинетике коррозии металлических конструкционных материалов, условиях возникновения коррозионных процессов, а также основные виды коррозии и коррозионных разрушений и способы защиты конструкций и изделий приведены в учебном пособии «Антикоррозионная защита металлов в строительстве» [13]. Большое внимание авторами уделено основам электроосаждения металлов, условиям и закономерностям нанесения покрытий на металлические основы с подробным описанием наиболее распространенных способов подготовки поверхности изделий, а также контроля качества покрытий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, В.Ф. Защита от коррозии строительных конструкций – основа обеспечения долговечности зданий и сооружений [Текст] / В.Ф. Степанова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – №3. – С. 16-19.
2. Шалимо, М.А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии [Текст] / М.А. Шалимо. – М.: Высшая школа, 1986. – 200 с.
3. Томашов, Н.Д. Теория коррозии и коррозионностойкие сплавы [Текст] / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова. – М.: Металлургия, 1986. – 359 с.
4. Розенфельд, И.Л. Коррозия и защита металлов. Локальные коррозионные процессы [Текст] / И.Л. Розенфельд. – М.: Металлургия, 1970. – 120 с.
5. Грилихес, С.Я. Электролитические и химические покрытия [Текст] / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.

6. Ажогин, Ф.Ф. Гальванотехника: справочное издание [Текст] / Ф.Ф. Ажогин, М.А. Беленький, И.Е. Галь. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
7. Каданер, Л.И. Справочник по гальваностегии [Текст] / Л.И. Каданер. – Киев: Техника, 1976. – 254 с.
8. Грилихес, С.Я. Оксидирование и фосфатирование металлов [Текст] / С.Я. Грилихес. – Л.: Химия, 1971. – 273 с.
9. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении [Текст] / П.С. Мельников. – М.: Машиностроение, 1991. – 386 с.
10. Вансовская, К.М. Гальванические покрытия [Текст] / К.М. Вансовская. – Л.: Машиностроение, 1984. – 119 с.
11. Дасоян, М.А. Технология электрохимических покрытий [Текст] / М.А. Дасоян, М.А. Пальмская, Е.В. Сахарова. – Л.: Машиностроение, 1989. – 391 с.
12. Гринберг, А.М. Гальванотехника: справочное издание [Текст] / А.М. Гринберг. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
13. Федосова, Н.Л. Антикоррозионная защита металлов в строительстве [Текст] / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, К.Е. Румянцева, А.В. Балмасов, М.Д. Чекунова. – Иваново: ИГАСУ, 2010. – 188 с.
14. Федосов, С.В. Защита от коррозии арматурной стали методом холодного фосфатирования [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. – №4. – 2009. – С. 83-87.
15. Федосов, С.В. Некоторые теоретические и прикладные аспекты противокоррозионной защиты арматурной стали [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева // Строительные материалы. – 2010. – №5. – С. 57-60.
16. Румянцева, В.Е. К вопросу об антикоррозионной защите стальной арматуры [Текст] / В.Е. Румянцева, А.В. Балмасов, К.Е. Румянцева, В.Е. Семенов // Материалы II международной научной конференции «Современные методы в теоретической и прикладной электрохимии». – Плес, ИГХТУ, 2010. – С. 219.
17. Синявский, В.С. Коррозия и защита алюминиевых сплавов [Текст] / В.С. Синявский, В.Д. Вальков, В.Д. Калинин. – М.: Металлургия, 1986. – 368 с.
18. Румянцева, К.Е. Основы материаловедения [Текст] / К.Е. Румянцева. – Иваново: ИГХТУ, 2010. – 144 с.
19. Лукомский, Ю.Я. Гальванические и лакокрасочные покрытия на алюминии и его сплавах [Текст] / Ю.Я. Лукомский, В.К. Горшков, П.Б. Разговоров. – Иваново: ИГХТУ, 2010. – 240 с.
20. Аверьянов, Е.Е. Толстослойное анодирование алюминиевых сплавов [Текст] / Е.Е. Аверьянов // Известия вузов. Химия и хим. технология, 2004. – Т. 48. – Вып. 2. – С. 128-131.

**Федосов Сергей Викторович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, ректор ГОУ ВПО «ИГАСУ».  
Тел.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: rektor@igasu.ru

**Румянцева Варвара Евгеньевна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и охрана окружающей среды»  
Тел.: +7 (4932) 37-34-36  
E-mail: varrym@gmail.com

**Федосова Нина Львовна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Кандидат химических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия и охрана окружающей среды».  
Тел.: +7 (4932) 37-34-36

**Румянцева Кира Евгеньевна**

Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология электрохимических производств»  
E-mail: Ki-ru@mail.ru

---

FEDOSOV S.V., ROUMYANTSEVA V.Ye., FEDOSOVA N.L., ROUMYANTSEVA K.Ye.

**ANTICORROSIVE PROTECTION OF METALS IN BUILDING:  
PROBLEMS AND WAYS OF THEIR DECISION**

*This paper presents an evaluation of currently existing methods for protecting building structures from the corrosive effects of aggressive environments, an analysis of existing physical, chemical and electrochemical methods of coating, formulated the requirements for protective and special coatings on metal products. Special attention paid to the electrochemical and chemical methods of coating various metals and alloys. The possibility and feasibility of the formation of the protected from corrosion surface conversion layer, in particular with the use of cold phosphate fatirovaniya steel reinforcement in concrete structures demonstrated.*

**Keywords:** *corrosion, galvanic coatings, building construction, metal alloys, zinc, phosphate, protection valves.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, V.F. Zawita ot korrozii stroitel'nyh konstrukcij – osnova obespechenija dolgovechno-sti zdanij i sooruzhenij [Tekst] / V.F. Stepanova // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2005. – №3. – S. 16-19.
2. Shalimo, M.A. Zawita betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij ot korrozii [Tekst] / M.A. Shalimo. – M.: Vysshaja shkola, 1986. – 200 s.
3. Tomashov, N.D. Teorija korrozii i korroziionnostojkie splavy [Tekst] / N.D. Tomashov, G.P. Chernova. – M.: Metallurgija, 1986. – 359 s.
4. Rozenfel'd, I.L. Korrozija i zawita metallov. Lokal'nye korroziionnye processy [Tekst] / I.L. Rozenfel'd. – M.: Metallurgija, 1970. – 120 s.
5. Grilihes, S.Ja. Jelektroliticheskie i himicheskie pokrytija [Tekst] / S.Ja. Grilihes, K.I. Tihonov. – L.: Himija, 1990. – 288 s.
6. Azhogin, F.F. Gal'vanotehnika: spravocnoe izdanie [Tekst] / F.F. Azhogin, M.A. Belen'kij, I.E. Gal'. – M.: Metallurgija, 1987. – 736 s.
7. Kadaner, L.I. Spravochnik po gal'vanostegii [Tekst] / L.I. Kadaner. – Kiev: Tehnika, 1976. – 254 s.
8. Grilihes, S.Ja. Oksidirovanie i fosfatirovanie metallov [Tekst] / S.Ja. Grilihes. – L.: Himija, 1971. – 273 s.
9. Mel'nikov, P.S. Spravochnik po gal'vanopokrytjam v mashinostroenii [Tekst] / P.S. Mel'nikov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 386 s.
10. Vansovskaja, K.M. Gal'vanicheskie pokrytija [Tekst] / K.M. Vansovskaja. – L.: Mashinostroenie, 1984. – 119 s.
11. Dasojan, M.A. Tehnologija jelektrohimicheskikh pokrytij [Tekst] / M.A. Dasojan, M.A. Pal'mskaja, E.V. Saharova. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 391 s.
12. Grinberg, A.M. Gal'vanotehnika: spravocnoe izdanie [Tekst] / A.M. Grinberg. – M.: Metallurgija, 1987. – 736 s.
13. Fedosova, N.L. Antikorroziionnaja zawita metallov v stroitel'stve [Tekst] / N.L. Fedosova, V.E. Rumjanceva, K.E. Rumjanceva, A.V. Balmasov, M.D. Chekunova. – Ivanovo: IGASU, 2010. – 188 s.
14. Fedosov, S.V. Zawita ot korrozii armaturnoj stali metodom holodnogo fosfatirovanija [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva // Nauchno-tehnicheskij zhurnal. Vestnik MGSU. – №4. – 2009. – S. 83-87.
15. Fedosov, S.V. Nekotorye teoreticheskie i prikladnye aspekty protivokorroziionnoj zawity armaturnoj stali [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva // Stroitel'nye materialy. – 2010. – №5. – S. 57-60.
16. Rumjanceva, V.E. K voprosu ob antikorroziionnoj zawite stal'noj armatury [Tekst] / V.E. Rumjanceva, A.V. Balmasov, K.E. Rumjanceva, V.E. Semenov // Materialy II mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye metody v teoreticheskoj i prikladnoj jelektrohimii». – Ples, IGHTU, 2010. – S. 219.
17. Sinjavskij, V.S. Korrozija i zawita aljuminievych splavov [Tekst] / V.S. Sinjavskij, V.D. Val'kov, V.D. Kalinin. – M.: Metallurgija, 1986. – 368 s.
18. Rumjanceva, K.E. Osnovy materialovedenija [Tekst] / K.E. Rumjanceva. – Ivanovo: IGHTU, 2010. – 144 s.
19. Lukomskij, Ju.Ja. Gal'vanicheskie i lakokrasochnye pokrytija na aljuminii i ego splavah [Tekst] / Ju.Ja. Lukomskij, V.K. Gorshkov, P.B. Razgovorov. – Ivanovo: IGHTU, 2010. – 240 s.
20. Aver'janov, E.E. Tolstoslojnoe anodirovanie aljuminievych splavov [Tekst] / E.E. Aver'janov // Izvestija vuzov. Himija i him. tehnologija, 2004. – T. 48. – Vyp. 2. – S. 128-131.

### **Fedosov Sergey Viktorovich**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo  
Academician RAABS, doctor of technical science, professor  
Ph.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: rektor@igasu.ru

### **Roumyantseva Varvara Yevgenevna**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo  
Candidate of technical science, associate professor of department «Chemistry and preservation of the environment»  
Ph.: +7(4932) 37-34-36  
E-mail: varrym@gmail.com

### **Fedosova Nina Lvovna**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo  
Candidate chemical science, professor, head of department «Chemistry and preservation of the environment»  
Ph.: +7(4932) 37-34-36

### **Roumyantseva Kira Yevgenevna**

Ivanovo state himiko-technological university, Ivanovo  
Candidate of technical science, associate professor of department «Technology of electrochemical manufactures»  
E-mail: Ki-ru@mail.ru



ХРИСТОФОРОВ А. И., ХРИСТОФОРОВА И.А., КУЗЬМИН Д.И.

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ  
ОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ  $\text{Na}^+$** 

*В статье представлены теоретические воззрения на основные характеристики мелкозернистых бетонных смесей и бетонов на их основе. В дополнение приведены результаты исследований направленных на изучение возможности повышения подвижности мелкозернистой бетонной смеси при помощи модификации ее органическими соединениями  $\text{Na}^+$  и описания механизма пластификации. Исследования проводились как по стандартным методикам, так и с привлечением вискозиметра «Reotest 2.1», позволяющего определять с большей точностью и достоверностью изменения реологических свойств мелкозернистой бетонной смеси.*

**Ключевые слова:** Мелкозернистый бетон, подвижность бетонной смеси, органическими соединениями  $\text{Na}^+$ , увеличение прочности при сжатии.

Мелкозернистый бетон стал предметом систематических исследований в СССР с середины пятидесятых годов. Это было связано с организацией производства бетона в регионах, где отсутствуют месторождения крупного заполнителя.

До начала 70-х годов мелкозернистый бетон использовался, в основном, для изготовления неармированных изделий. Сказывалось отсутствие нормативной базы, определенное недоверие к материалу со стороны проектировщиков и практиков.

В настоящее время ввиду развития темпов строительства проблема использования мелкозернистых бетонов получила новое развитие. Большая часть европейской территории России не имеют месторождений крупного заполнителя или имеют месторождения осадочных пород, ограничено пригодных для использования в бетоне. Добыча камня и переработка его на щебень требуют значительных затрат электроэнергии и рабочей силы.

В мелкозернистых бетонах количество цемента и воды выше, чем в основных бетонах. Чтобы, прочность мелкозернистых бетонов из малоподвижных смесей была примерно равной марке применяемого цемента, его расход должен составлять около 600-750 кг, а воды 270-320 л на 1 м<sup>3</sup> бетона [1].

Наилучшая удобоукладываемость мелкозернистых бетонных смесей обусловлена определенным соотношением песка и цемента. Оптимальное соотношение 1:4 для крупных и 1:1 для мелких песков. Правило постоянства водосодержания для этих смесей неприменимо [2].

В структуре песчано-цементной бетонной смеси Ю.М. Баженов [3] рассматривает четыре характерные реологические зоны, зависящие от соотношения цемента, песка и воды, обеспечивающих требуемую удобоукладываемость смеси.

Первая зона – это смеси с соотношениями цемента и песка выше 2:3; зерна песка в таких смесях находятся на значительных расстояниях друг от друга и вязкость смеси определяется главным образом ее цементоводным отношением. Уменьшение содержания цемента в смеси снижает ее водопотребность почти по прямой зависимости. Вызванное уменьшением цемента увеличение песка в смеси незначительно влияет на ее вязкость и только несколько искривляет указанную зависимость. При вибрировании такие смеси склонны к расслоению из-за оседания зерен песка.

Вторая зона характеризуется отношениями цемента и песка от 1:4 до 2:3, т.е. включает составы практически применяемых конструктивных мелкозернистых бетонов. В цементно-песчаных смесях второй зоны увеличение содержания песка уже более значительно сказывается на вязкости смесей, и хотя их водопотребность падает с уменьшением цементопесчаного отношения, кривая водопотребности более полого, чем в первой зоне. При использовании мелких песков их влияние на повышение вязкости больше и кривая водопотребности пойдет выше и более полого, чем в случае применения средних песков.

В третьей зоне при соотношениях цемента и песка примерно от 1:10 до 1:4 зерна песка, покрытые тонкими пленками теста, взаимодействуют друг с другом; увеличение содержания песка значительно повышает вязкость смеси. В начале зоны влияние увеличения количества песка и уменьшения количества цемента на вязкость смеси взаимно компенсируется и кривая водопотребности переходит в участок прямой, параллельный оси абсцисс. Затем влияние песка на вязкость смеси начинает превалировать и увеличение его содержания повышает водопотребность.

Третья зона характеризует область строительных растворов, где цементного теста уже недостаточно для заполнения пустот между зёрнами песка. Дальнейшему увеличению содержания песка в смеси соответствует четвертая зона. В этой зоне цементного теста уже не хватает для смазки зёрен песка. Для сохранения удобоукладываемости приходится увеличивать содержание воды, однако удельная поверхность твердой фазы недостаточна для ее удержания, и, если не применять водоудерживающие добавки, смесь расслаивается.

Минимальную водопотребность цементно-песчаные бетонные смеси будут иметь на границе второй и третьей зон при оптимальном цементно-песчаном отношении, которое обеспечивает наилучшую удобоукладываемость, наибольшую плотность и прочность бетона.

Это оптимальное соотношение зависит от качества песка, свойств цемента и водоцементного отношения (или подвижности бетонной смеси).

При одном и том же способе уплотнения смеси для каждого цементно-песчаного отношения будет свое оптимальное водоцементное отношение, при котором достигается максимальная прочность бетона данного состава.

Установлено, что цементный камень имеет более высокую прочность, нежели песчаный бетон, при низких значениях водоцементного отношения. С увеличением водоцементного отношения их прочности сближаются, и затем прочность песчаного бетона начинает превосходить прочность цементного камня. Это объясняется тем, что при высоких водоцементных отношениях пористость цементного камня более высокая, чем пористость песчаного бетона, а также тем, что силы адгезии цементного камня с заполнителями становятся больше, чем силы когезии [3].

Аналогичная картина наблюдается и при сравнении мелкозернистых бетонов с обычными на крупных заполнителях; мелкозернистые бетоны могут иметь повышенные прочности при малых значениях водоцементного отношения, что возможно при увеличенных расходах цемента и обеспечении хорошего уплотнения. При практически наиболее широко применяемых водоцементных отношениях от 0,4 до 0,7 прочности обычных бетонов на крупных заполнителях хорошего качества выше прочности мелкозернистых бетонов.

Отсутствие скелета крупного заполнителя и повышенное количество цементного камня у мелкозернистых бетонов повышает их деформативные свойства. Модуль упругости мелкозернистых бетонов на 25-35% ниже модуля упругости равнопрочных бетонов с крупными заполнителями. Предельные деформации мелкозернистых бетонов, по данным [2], находятся в следующих пределах: при сжатии 1,2-4,1 мм/м, при изгибе 0,3-0,45 мм/м, при растяжении 0,17-0,3 мм/м, т. е. превосходят подобные деформации обычного тяжелого бетона. Предельная деформативность бетонов может быть увеличена при введении в состав бетонов поверхностно активных добавок.

Мелкозернистые бетоны обладают гораздо большей усадкой и ползучестью, чем бетоны с крупным заполнителем. По данным И.И. Улицкого [4], предельные относительные деформации усадки мелкозернистых бетонов в 2-4 раза, а значения характеристики ползучести на 20-100% выше, чем у обычных бетонов. Изменения же величин усадки и ползучести от различных факторов подчиняются тем же закономерностям, что и у обычных бетонов.

Мелкозернистые бетоны вследствие особенности своей структуры, как правило, являются менее долговечным материалом, чем равнопрочные и равноподвижные с ними обычные бетоны. Однако, применяя некоторые технологические мероприятия по увеличению плотности и уменьшению морозостойкости цементного камня, можно получить бетоны высокой долговечности. Высокая однородность мелкозернистых бетонов, пониженные величины внутренних напряжений, хемосорбционное взаимодействие зёрен кварца с цементом и другие факторы при условии обеспечения повышенной плотности цементного камня позволяют получить даже большую долговечность мелкозернистых бетонов, чем обычных [5].

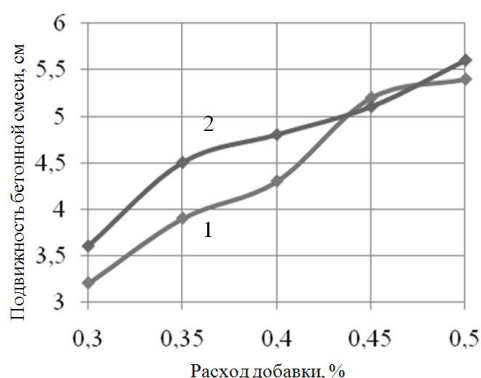
Опыт проектирования и практика изготовления показывают, что для большинства регионов экономически выгодно даже простое исключение щебня из состава бетонной смеси, но гораздо больший эффект достигается при проектировании конструкций с учетом особенностей свойств мелкозернистого бетона, технологии его изготовления, а также при правильном выборе заполнителей, химических добавок, вяжущих.

В свежеуложенной пластичной бетонной смеси в результате оседания твердой фазы может произойти водоотделение. Водоотделение может ослабить поверхность, сделать ее недолговечной, содержащей менее плотный цементный камень с более мелкими частицами заполнителя. Водоотделение можно уменьшить путем введения в смеси добавок, обеспечивающих воздухововлечение.

Долговечность бетона при определенных условиях эксплуатации – одна из его наиболее важных характеристик. Разрушение бетона может произойти при действии мороза, щелочной коррозии заполнителя, карбонизационной усадке, при химическом воздействии агрессивных сред и т. д. Развитие этих процессов можно изменить с помощью добавок.

Повышение морозостойкости бетона, особенно с помощью воздухововлекающих добавок, справедливо считается одним из самых эффективных способов решения этой актуальной проблемы [6].

Для анализа влияния модифицирующих свойств добавки органических соединений  $\text{Na}^+$  на мелкозернистую смесь и бетон были проведены исследования, при двух значениях водоцементного отношения на уровне 0,4 и 0,5, представленные на рисунках 1-4.



**Рисунок 1 – Зависимость подвижности бетонной смеси от расхода модифицирующей добавки органических соединений  $\text{Na}^+$ 1 – В/Ц на уровне 0,4; 2 – В/Ц на уровне 0,5**

Анализ рисунка 1 позволяет выявить нарастание подвижности с увеличением расхода добавки органических соединений  $\text{Na}^+$ , при проведении исследований с выбранными водоцементными отношениями. Средние значения подвижности при водоцементном отношении на уровне 0,5 выше, чем на уровне 0,4.

На рисунке 2 представлены результаты исследований воздействия расхода добавки органических соединений  $\text{Na}^+$  на реологические свойства бетонной смеси при водоцементном соотношении – 0,5. Исследования проводились с использованием вискозиметра «Reotest 2.1». Данные исследования позволяют с большей точностью и достоверностью изучить процесс пластификации бетонной смеси.

Анализ рисунка 2 показывает, что расход добавки 0,3% недостаточен для достижения необходимой подвижности смеси, что выражается в разрыве потока, в то время как расход 0,45% приводит к значительному увеличению вязкости смеси, а расход 0,5% пластифицирует смесь до литьевого состояния.

Проанализировав рисунки 3 и 4, можно выявить следующий ряд закономерностей, увеличение расхода добавки органических соединений  $\text{Na}^+$  свыше 0,35% от массы цемента, ведет к снижению плотности, вследствие увеличения воздухововлечения. Это приводит к снижению прочности при сжатии.

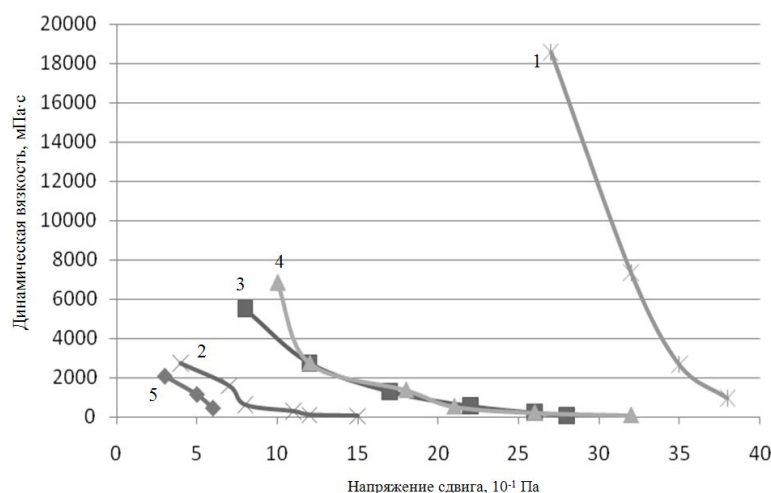


Рисунок 2 – Зависимость динамической вязкости от напряжения сдвига для модифицированного мелкозернистого бетона с расходом добавки органических соединений Na<sup>+</sup> на уровне: 1 – 0,3; 2 – 0,35; 3 – 0,4; 4 – 0,45; 5 – 0,5

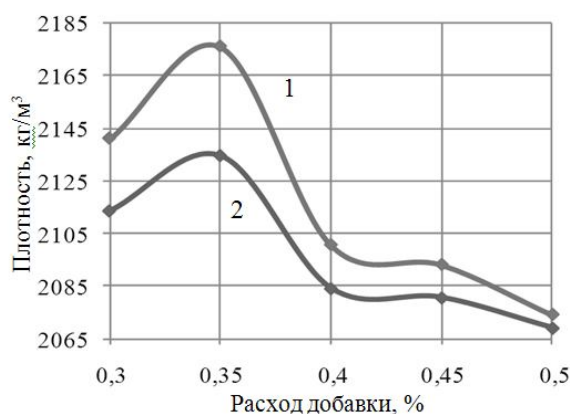


Рисунок 3 – Зависимость плотности образцов в возрасте 28 суток от расхода добавки органических соединений Na<sup>+</sup>: 1 – В/Ц на уровне 0,4; 2 – В/Ц на уровне 0,5

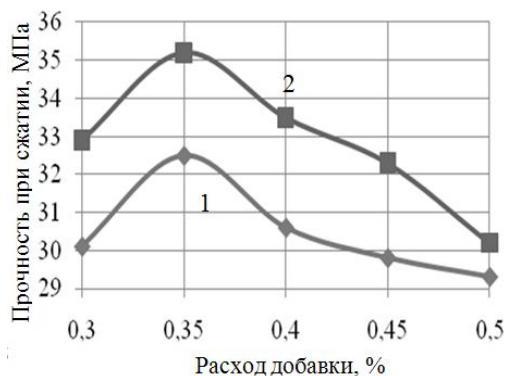


Рисунок 4 – Зависимость прочности на сжатие образцов в возрасте 28 суток от расхода добавки

Представленные исследования позволяют говорить о возможности использования органических соединений Na<sup>+</sup>, в качестве пластифицирующей добавки для мелкозернистых бетонов. За счет увеличения подвижности бетонной смеси удастся получить повышение характеристик бетона. Представленные результаты исследований подвижности с помощью вискозиметра «Reotest 2.1», позволяют говорить о возможности изучения реологических свойств на более высоком уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананенко, А.А. Прочностные и деформативные свойства мелкозернистых бетонов [Текст] / А.А. Ананенко, В.В. Нижневясов., А.С. Успенский // Известия вузов. Строительство. – 1999. – №1. – С. 34.
2. Крылов, Б.А. Состояние современного строительства и строительной науки [Текст] / Б.А. Крылов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. – №5. – С. 6.
3. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] / Ю.М. Баженов, В.И. Калашников, В.С. Демьянова. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
4. Львович, К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве [Текст] / К.И. Львович. – М.: Строй Бетон, 2007. – 320 с.
5. Морозов, Н.М., Хозин, В.Г. Песчаный бетон высокой прочности [Текст] / Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Строительные материалы. – 2005. – №11.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века [Текст] / Ю.М. Баженов // Новые научные направления строительного материаловедения: Матер. докл. Академич. чтений РААСН. – Белгород, БГТУ. – Ч. I., 2005. – С. 8-19.

**Христофоров Александр Иванович**

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

**Христофорова Ирина Александровна**

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

**Кузьмин Дмитрий Игоревич**

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир  
Аспирант кафедры «Химической технологии стекла и керамики»  
Тел.: +7 920 620 28 53  
E-mail: Kuzmin\_Dimitriy@mail.ru

---

HRISTOFOROV A.I., HRISTOFOROVA I.A., KUZMIN D.I.

**FINE-GRAINED CONCRETE MODIFIED ORGANIC CONNECTIONS  $Na^+$**

*In article theoretical views on the basic characteristics of fine-grained be-ton mixes and concrete on their basis are presented. In addition results of researches directed on studying of possibility of increase of mobility of a fine-grained concrete mix by means of updating by its organic connections  $Na^+$  and descriptions of the mechanism of plasticization are resulted. Researches were spent both by standard techniques, and with attraction viscometer «Reotest 2.1», allowing to define with more accuracy and reliability of change of rheological properties of a fine-grained concrete mix.*

**Keywords:** *Fine-grained concrete, mobility of a concrete mix, organic connections  $Na^+$ , durability increase at compression.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ananenko, A.A. Prochnostnye i deformativnye svojstva melkozernistykh betonov [Tekst] / A.A. Ananenko, V.V. Nizhevjasov., A.S. Uspenskij // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 1999. – №1. – S. 34.
2. Krylov, B.A. Sostojanie sovremennogo stroitel'stva i stroitel'noj nauki [Tekst] / B.A. Krylov // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2010. – №5. – S. 6.
3. Bazhenov, Ju.M. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [Tekst] / Ju.M. Bazhenov, V.I. Kalashnikov, V.S. Dem'janova. – M.: ASV, 2006. – 368 s.

4. L'vovich, K.I. Peschanyj beton i ego primenenie v stroitel'stve [Tekst] / K.I. L'vovich. – M.: Stroj Beton, 2007. – 320 s.

5. Morozov, N.M., Hozin, V.G. Peschanyj beton vysokoj prochnosti [Tekst] / N.M. Morozov, V.G. Hozin // Stroitel'nye materialy. – 2005. – №11.

6. Bazhenov, Ju.M. Tehnologija betonov XXI veka [Tekst] / Ju.M. Bazhenov // Novye nauchnye napravlenija stroitel'nogo materialovedenija: Mater. dokl. Akademich. chtenij RAASN. – Belgorod, BGTU. – Ch. I., 2005. – S. 8-19.

**Hristoforov Alexander Ivanovich**

Vladimir state university, Vladimir

Doctor of technical science, professor, head of department «Chemical technology of glass and ceramics»

Ph.: +7 920 929 01 82

E-mail: khristoforov@mail.ru

**Hristoforova Irina Aleksandrovna**

Vladimir state university, Vladimir

Doctor of technical science, professor of department «Chemical technology of glass and ceramics»

Ph.: +7 910 774 54 26

E-mail: khristoforova-i@mail.ru

**Kuzmin Dmitry Igorevich**

Vladimir state university, Vladimir

Post-graduate student of department «Chemical technology of glass and ceramics»

Ph.: +7 920 620 28 53

E-mail: Kuzmin\_Dimitriy@mail.ru

ЧЕРНОВ С.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К СТАРЕНИЮ КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ХОЛОДНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

*Особое место среди материалов, применяемых для ремонта покрытий автомобильных дорог, занимает холодный асфальтобетон. В связи с этим были проведены исследования по разработке комплексно-модифицированной холодной асфальтобетонной смеси, содержащей адгезионные и полимерные добавки. В статье приводятся испытания по устойчивости к старению комплексно-модифицированных холодных асфальтобетонных смесей, проводятся сравнения со смесями без добавок и обосновывается применение холодного асфальтобетона в качестве ремонтного материала.*

**Ключевые слова:** холодная асфальтобетонная смесь, технологическое старение, дизельное топливо, слеживаемость смесей.

Автомобильная дорога, как любое другое инженерное сооружение, рассчитана на определенный срок службы, в течение которого она подвергается различного рода и количества воздействий транспорта и погодно-климатических факторов. Самым первым и наиболее незащищенным ее элементом, испытывающим все эти воздействия, является асфальтобетонное покрытие.

Дорожные службы всего мира ежегодно выполняют значительные объемы работ по ликвидации появившихся дефектов и разрушений, но несмотря на это, прирост протяженности дорог, требующих ремонта, превосходит объем ремонтируемых работ.

В настоящее время в качестве ремонтного материала применяются горячие и холодные асфальтобетонные смеси, а также литой асфальтобетон. Выбор того или иного метода ямочного ремонта покрытий автомобильных дорог зависит от многих факторов [1]:

- качества заделки дефекта, соответствующего показателям плотности, прочности, ровности и шероховатости покрытия;
- необходимого продолжительного срока службы ремонтируемого места;
- наличия или доступности требуемых материалов, машин и установок для выполнения ремонта по выбранному методу;
- оперативности открытия движения транспорта по месту ремонта;
- стоимости и экономичности ремонтных работ.

Холодный асфальтобетон занимает особое место среди ремонтных материалов [2]. Он позволяет производить круглогодичный ремонт покрытия без ухудшения физико-механических свойств на первоначальном этапе формирования его структуры.

Однако в процессе производства холодной асфальтобетонной смеси, ее хранения и эксплуатации в дорожном покрытии имеет место ряд факторов, оказывающих влияние как на свойства битума, так и на свойства самого асфальтобетона. Так, холодные асфальтобетонные смеси в отличие от горячих смесей содержат на 25-30% меньше вяжущего, а значит, существует большая вероятность их интенсивного старения в процессе приготовления уже на первом.

Под старением понимают совокупность физических и химических превращений, происходящих в композиционном материале при производстве, хранении, транспортировании и при эксплуатации под действием тепла, света, кислорода, влаги, агрессивных химических соединений, нагрузок и других факторов, приводящих к потере им заданных эксплуатационных свойств [3].

На практике выделяют два этапа старения:

- **технологическое старение**, которое реализуется стремительно и связано с влиянием высокой температуры на время хранения битума, приготовления смеси, ее хранения и укладкой. При этом происходит интенсивное испарение легких фракций;

- **долговременное старение**, связанное с влиянием климатических факторов во время эксплуатации битумного слоя.

Для холодных асфальтобетонных смесей наибольшую опасность представляет долговременное старение, так как тонкие пленки битума в процессе эксплуатации в результате испарения разжижителя еще более утончаются, что и приводит к интенсивному старению. В связи с этим задача повышения качества холодного асфальтобетона требует применения жидких органических вяжущих, которые одновременно будут сохранять свои высокие физико-механические и реологические свойства.

С целью увеличения объема применения холодных асфальтобетонных смесей в качестве ремонтного материала необходимо:

- повышение прочности и теплоустойчивости асфальтобетона;
- улучшение водостойкости за счет повышения адгезионных свойств жидких битумов;
- сокращение времени формирования структуры уплотненного слоя из холодного асфальтобетона и снижение содержания в вяжущем испаряемого разжижителя.

Для направленного изменения структуры и свойств холодной асфальтобетонной смеси желательно применять жидкие вяжущие, содержащие структурообразующие и поверхностно-активные добавки [4]. Как правило, применение модификаторов позволяет замедлить скорость протекания окислительных процессов и способствует значительному повышению термоокислительной устойчивости модифицированного битума и повышению долговечности асфальтобетона на его основе.

В ДорТрансНИИ РГСУ в этих целях в качестве круглогодичного ремонтного материала была разработана комплексно-модифицированная холодная асфальтобетонная смесь, стабилизированная адгезионно-полимерными модификаторами и обладающая повышенной долговечностью.

В качестве поверхностно-активной присадки использовался высокотемпературный адгезив КАДЭМ-ВТ, а разжиженное вяжущее содержало каучуко-полиолефиновый модификатор в количестве 2,6-3,0%. В лабораторных условиях добавка приготавливалась с использованием экструдера, позволяющего перемешивать компоненты в условиях повышенного давления, сдвигающих усилий и высокой температуры 180°C. Экструдер оборудован бункером для приема смеси агломерата модификатора и дробленого каучука в заданном соотношении и отдельным вводом для подачи части разогретого битума, выступающего в роли пластификатора. Кроме этого, для производства гранул использовался гранулятор с водяным охлаждением, установленный на выходе из экструдера.

Наибольшее значение в качестве адгезивов имеют катионактивные ПАВ, которые улучшают сцепление вяжущего с минеральным материалом, как основного характера, так и особенно кислого. Именно по этой причине в работе использовалось новое аминное соединение КАДЭМ-ВТ отечественного производства. Катионный - Адгезив - Эмульгатор - Высокотемпературный выпускается в соответствии с техническими требованиями стандарта ТУ 2482-009-0470 6205-03. Представлена добавка смесью алкиламидополиаминов и алкилимидазолинполиаминов, получаемых на основе кислот C<sub>16</sub> – C<sub>20</sub> растительного или животного происхождения, например, олеиновой. Особенно эффективно использование КАДЭМ-ВТ в составе битумного вяжущего при работе в зимних и осенне-весенних условиях.

Приготовление жидкого полимерно-битумного вяжущего протекало в две стадии. На начальном этапе в течении 3-4 часов происходило набухание и растворение добавки в растворителе, а затем производилось объединение с вязким битумом до получения однородной массы. В качестве исходного битума использовался вязкий битум марки БНД 60/90. Состав вяжущего включает: битум БНД 60/90 – 75-85%; разжижитель – 15-25%; каучуково-полиолефиновый модификатор – 2,6-3,0% и адгезионную присадку КАДЭМ-ВТ – 0,5% от массы вяжущего.

Приготовление разжиженного вяжущего было осуществлено в специальной лабораторной установке для модификации битумов, разработанной С.В. Парадеком, фирмой «Верросс». Исходный вязкий битум БНД 60/90 нагревали до температуры 130-150°C, после чего в



него вводили адгезионную присадку и раствор каучуково-полиолефинового модификатора в растворителе, разогретый до 80°C. По окончанию дозировки по массе компоненты перемешивались в течение 15-25 минут до получения однородной массы. При приготовлении вяжущего руководствовались требованиями ГОСТ 11955-82 для разжиженных битумов СГ 70/130 и добивались полного его соответствия нормативным требованиям. Результаты испытаний, приготовленного вяжущего представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические показатели модифицированных жидких битумов на основе разработанной добавки

Наименование показателей	Требования ГОСТ 11955-82 для СГ 70/130	Разжиженный битум СГ 70/130	Жидкий модифицированный битум
			Содержание добавки 3,0%
Условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С, с	70-130	78	114
Количество испарившегося разжижителя, %, не менее	8,0	8,3	8,7
Температура размягчения остатка после определения количества испарившегося разжижителя, °С, не ниже	39	39	47
Температура вспышке в открытом тигле, °С, не ниже	50	97	129

Из результатов приведенных исследований видно, что полученные жидкие модифицированные битумы отличаются от традиционных повышенной температурой размягчения остатка и высокой температурой вспышки.

В связи с ускоренным снижением деформативных свойств верхнего слоя асфальтобетонных покрытий на юге России, обусловленных старением битума, происходящего под действием высоких положительных температур, проводились исследования разработанной комплексно-модифицированной холодной асфальтобетонной смеси на устойчивость к процессам старения. Этот показатель оценивался по кинетике изменения физико-механических свойств асфальтобетонных образцов, предварительно прогретых в течение определенного количества часов.

Испытания проводились на асфальтобетонных образцах смеси типа Бх I марки, приготовленных на комплексно-модифицированном вяжущем. Для приготовления смеси использовались: гранитный щебень фр. 5-10 мм – 50%; отсев дробления фр. 0-5 мм – 45%; активированный минеральный порошок – 5%; разжиженное модифицированное вяжущее – 4,0-5,0%.

Прежде чем изучать процесс старения холодных асфальтобетонных смесей были проведены испытания по определению физико-механических показателей холодных асфальтобетонных смесей с добавками и без них.

Из анализа данных, представленных на рисунке 1, можно сделать вывод, что наблюдается преимущество модифицированных холодных асфальтобетонных смесей с каучуково-полиолефиновой добавкой по сравнению с американскими МАК-смесями и холодным асфальтобетоном без добавок. Необходимо также отметить, что разработанные модифицированные холодные асфальтобетонные смеси по основным физико-механическим показателям (предел прочности при 20°C, при 50°C и водостойкость) не уступают горячим асфальтобетонным смесям типа Б, III марки.

Изучение процессов старения вяжущего оценивали изменением показателей предела прочности при сжатии асфальтобетона при температуре 20°C сухих и водонасыщенных образцов, а также пределом прочности при сжатии при температуре 50°C. Данные показатели непосредственно связаны со структурным состоянием битумной пленки и при этом реагируют на изменение состояния асфальтобетона в процессе старения.

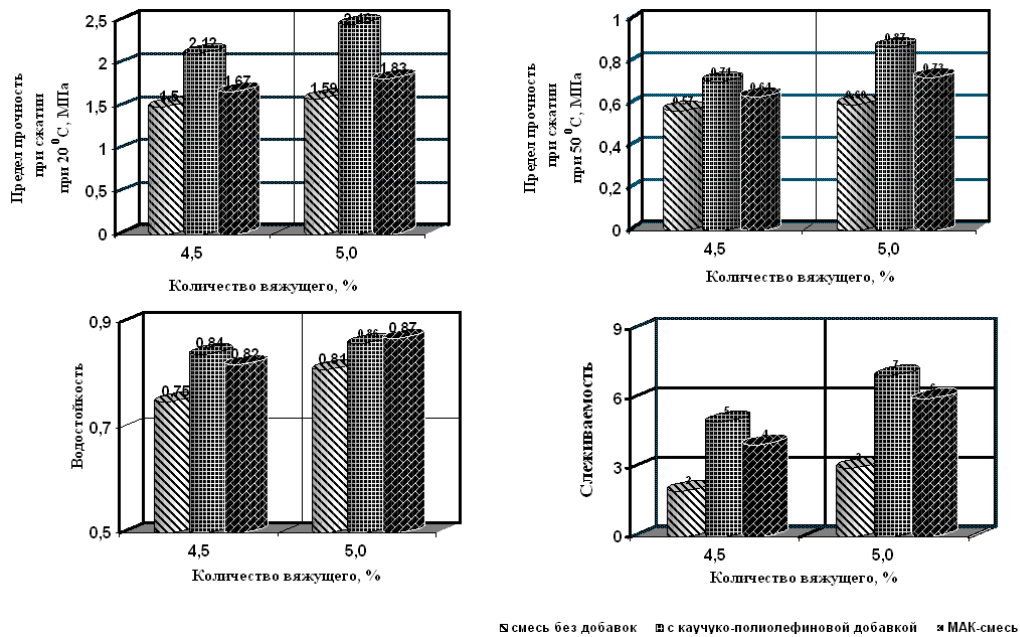


Рисунок 1 – Физико-механические показатели холодных асфальтобетонных смесей

Исследования осуществлялись с использованием термокамеры «Binder», оборудованной системой равномерного распределения воздуха по объему камеры. Эксперимент проводился при температуре 110°C, что соответствует температуре выпуска холодной асфальтобетонной смеси по ГОСТ 9128-97. Кроме этого температура равная 110°C применяется при испытании разжиженного вяжущего при определении количества испарившегося разжижителя.

Образцы смеси подвергались воздействию температуры и испытывались по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 12801-98 с периодичностью прогрева 4 часа.

За время старения асфальтобетона при термоокислительном воздействии принят отрезок времени от начала до момента падения предела прочности при сжатии при температуре 20°C ниже требуемой величины по ГОСТ 9128-97 для типа БХ I марки.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 2.

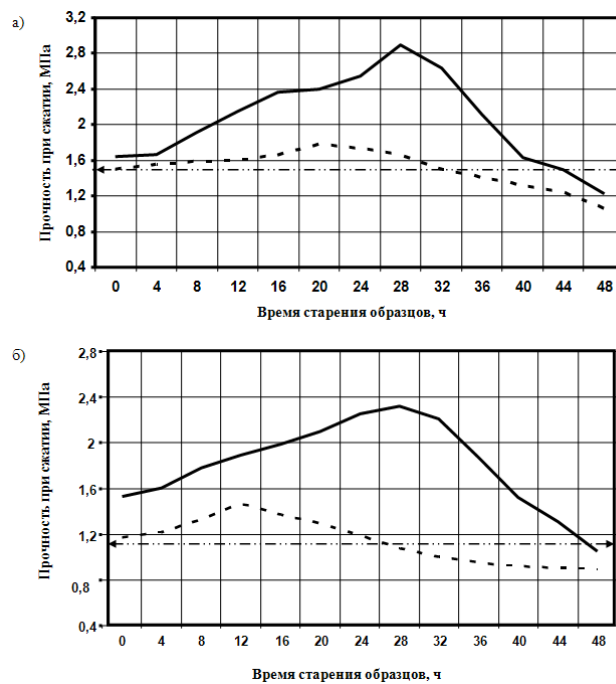


Рисунок 2 – Зависимость предела прочности при сжатии от времени: а – сухих образцов при температуре 20°C; б – водонасыщенных образцов при температуре 20°C

Из характера кривых видно, что в течение первых 8-10 часов в комплексно-модифицированном холодном асфальтобетоне происходит интенсивное испарение разжижителя, а затем наблюдается резкий набор прочности (10 до 28 ч). В дальнейшем на отрезке времени 28-42 ч. происходит перелом и коренное изменение структуры вяжущего, что приводит к плавному падению прочности. На основании полученных данных время термостабильности комплексно-модифицированной холодной асфальтобетонной смеси составило 42 ч, что позволяет отметить положительное влияние полимера на термоокислительную устойчивость вяжущего по сравнению с вяжущим без добавок.

Проведенные исследования позволили установить положительное влияние и на кинетику роста прочности при термоокислительном воздействии на асфальтобетон, и на период старения. Разработанные комплексно-модифицированные холодные асфальтобетонные смеси могут быть использованы в качестве ремонтного материала, не уступая по основным физико-механическим показателям горячим асфальтобетонным смесям типа Б, III марки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немчинов, М. Рецепты дорожного долголетия [Текст] / М. Немчинов // Автомобильные дороги, 2002. – №12 – С. 72.
2. Лаврухин, В.П. Холодные асфальтобетонные смеси с повышенными физико-механическими свойствами на жидких битумно-каучуковых вяжущих [Текст] / В.П. Лаврухин, Ю.И. Калгин, А.А. Михайлов // Материалы науч. практ. семинар «Новые технологии и материалы, применяемые для содержания автомобильных дорог», – Ростов-на-Дону, РГСУ 2002, – С. 54-59.
3. Бахрах, Г.С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его решения [Текст] / Г.С. Бахрах // Дорожно-строительные материалы: Тр. ГипродорНИИ. – М., 1974. – Вып. 9 – С. 84-96.
4. Лаврухин, В.П. Современные технологии получения холодных асфальтобетонных смесей с повышенными физико-механическими свойствами [Текст] / В.П. Лаврухин, Ю.И. Калгин, А.А. Михайлов // Актуальные вопросы строительства: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 40-летию строит. ф-та. Мордов. ун-та. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. – С. 398-401.

#### **Чернов Сергей Анатольевич**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Аспирант кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» Дорожно-транспортного института  
Тел.: +7 908 178 76 67  
E-mail: sergei\_a\_chernov@rambler.ru

---

CHERNOV S.A.

### ISSLEDOVANIE RESISTANCE TO AGING COMPLEX-MODIFIED COLD ASPHALT MIXTURES

*The special place among the materials applied for repair of coverings of highways, occupies a cold asphalt concrete. In this connection researches on working out in a complex-modified cold asphalt concrete a mix containing adhesive and polymeric additives have been conducted. In article tests on stability to aging in a complex-modified cold asphalt concrete mixes are led, comparisons with mixes without additives are spent and application of a cold asphalt concrete as a repair material is proved.*

**Keywords:** cold asphalt-concrete mixtures, the technological aging, diesel fuel, blocking of mixtures.

### BIBLIOGRAPHY

1. Nemchinov, M. Recepty dorozhnogo dolgoletija [Tekst] / M. Nemchinov // Avtomobil'nye dorogi, 2002. – №12 – S. 72.

2. Lavruhin, V.P. Holodnye asfal'tobetonnye smesi s povyshennymi fiziko-mehanicheskimi svojstvami na zhidkih bitumno-kauchukovyh vjazhuvih [Tekst] / V.P. Lavruhin, Ju.I. Kalgin, A.A. Mihajlov // Materialy nauch. prakt. seminar «Novye tehnologii i materialy, primenjaemye dlja sodержanija avtomobil'nyh dorog», – Rostov-na-Donu, RGSU 2002, – S. 54-59.

3. Bahrah, G.S. Starenie asfal'tobetonnyh pokrytij i puti ego reshenija [Tekst] / G.S. Bahrah // Dorozhno-stroitel'nye materialy: Tr. GiprodorNII. – M., 1974. – Vyp. 9 – S. 84-96.

4. Lavruhin, V.P. Sovremennye tehnologii poluchenija holodnyh asfal'tobetonnyh smesej s povyshennymi fiziko-mehanicheskimi svojstvami [Tekst] / V.P. Lavruhin, Ju.I. Kalgin, A.A. Mihajlov // Aktual'nye voprosy stroitel'stva: materialy Vseros. nauch.-tehn. konf., posvjawennoj 40-letiju. stroit. f-ta. Mor-dov. un-ta. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2002. – S. 398-401.

**Chernov Sergey Anatolevich**

Rostov state building university, Rostov-na-Donu

Post-graduate student of department «Highways and airdromes»

Ph.: +7 908 178 76 67

E-mail: sergei\_a\_chernov@rambler.ru

## Уважаемые авторы!

### Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей

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

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

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

#### **Обязательные элементы:**

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

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

*Адрес учредителя журнала*

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

*Адрес редакции*

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

Технический редактор С.В. Солопов  
Компьютерная верстка С.В. Солопов, Н.В. Первых

Подписано в печать 15.03.2011 г.  
Формат 70x108 1/16. Печ. л. 3,58.  
Тираж 400 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

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