



Научно-технический журнал  
Орловского государственного  
технического университета  
Издается с 2003 года.  
Выходит шесть раз в год  
**№6/26 (574) 2009**  
**(ноябрь-декабрь)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Известия ОрелГТУ

Учредитель – государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Орловский государственный технический университет»

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

<i>Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Туликов М.М.</i> Деформации поверхности при прокладке мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей.....	3
<i>Карпенко С.Н.</i> Методы решения физически нелинейных задач железобетона в конечных приращениях.....	9
<i>Коробко А.В., Калашникова Н.Г., Малинкин Н.С.</i> Расчет трапециевидных пластинок с комбинированными граничными условиями с помощью МИКФ.....	15
<i>Коробко В.И., Морозов С.А.</i> Краткий аналитический обзор работ по проблеме расчета строительных конструкций (балок, пластинок и оболочек) методом предельного равновесия.....	21
<i>Мурашкин Г.В., Пищулев А.А.</i> Использование деформационных моделей для определения несущей способности железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями сжатой зоны бетона.....	36
<i>Поляков В.И.</i> Взаимосвязь частоты продольных и поперечных колебаний при испытании конструкций вибрационными методами.....	42
<i>Пятикрестовский К.П.</i> Особенности совместной работы тонких обшивок с каркасом деревянных пространственных конструкций и расчет их взаимного крепления.....	45
<i>Турков А.В., Савин С.Ю., Бояркина О.В.</i> Взаимосвязь задач поперечного изгиба и собственных колебаний балок нелинейно переменной высоты.....	50
<i>Узунова Л.В.</i> Об эффективности использования высокопрочной арматуры в сжатых слоистых железобетонных стержнях.....	55
<i>Ушаков С.И.</i> Деформации и микротрещинообразование в элементах из эпоксидного полимербетона при осевом сжатии кратковременной нагрузкой.....	60
<i>Федоров В.С., Меднов Е.А.</i> Экспериментальные исследования неразрезных двухпролетных стальных балок при запроектных воздействиях.....	66

### Архитектура и градостроительство

<i>Купцова Е.В., Коршунова Н.Н.</i> Системы факторов, влияющих на формирование архитектурных решений экоселений.....	69
--	----

### Строительные материалы и технологии

<i>Анисимов П.В., Мевлидинов З.А., Лукашенко М.В.</i> Повышение эффективности осушения дренающего слоя дорожных одежд.....	76
<i>Аунг Мо Хейн.</i> Оценка осадок поверхности грунта при проходке тоннелей.....	80
<i>Кокодеева Н.Е.</i> Определение срока службы дорожной одежды и темпов ее разрушения с учетом изменения влажности грунта в расчетный период года (с позиции теории риска).....	86

#### 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.  
Колчунов В.И. д.т.н., проф.  
Константинов И.С. д.т.н., проф.  
Новиков А.Н. д.т.н., проф.  
Цопова 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.  
Данилевич Д.В. к.т.н., доц.*

#### Редколлегия:

*Бондаренко В.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Коробко А.В. д.т.н., проф.  
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Меркулов С.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Ольхов Я.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Рымшин В.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Серпик И.Н. 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.*

#### Ответственные за выпуск:

*Никулин А.И. к.т.н., доц.  
Солопов С.В.*

#### Адрес редколлегии:

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»

© ОрелГТУ, 2009

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  
of Orel State Technical University  
The journal is published since 2003.  
The journal is published 6 times a year

**№6/26 (574) 2009**  
**(november-december)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

Izvestia Orel State Technical University  
The founder – The State Higher Professional Institution  
Orel State Technical University

## 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.  
**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.  
**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Assis-  
tant Prof.

## Editorial committee

**Bondarenko V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Merkulov C.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Olkov Y.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Serpik I.N.** 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.

## Responsible for edition:

**Nikulin A.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.  
**Solopov S.V.**

## Address

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

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

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

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

©OSTU, 2009

## Contents

### Theory of engineering structures. Building units

<b>Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Tupikov M.M.</b> Surface settlements, caused by shallow service tunnels.....	3
<b>Karpenko S.N.</b> Methods of solution physically nonlinear problems of reinforced concrete in finite increments.....	9
<b>Korobko A.V., Kalashnikova N.G., Malinkin N.S.</b> Calculation of trapezoid plates with the combined boundary conditions by means of IMFI.....	15
<b>Korobko V.I., Morozov S.A.</b> Short's frosts the state-of-the-art review of works on a problem of calculation of building designs (beams, plates and covers) a method of limiting balance.....	21
<b>Murashkin G.V., Pischulev A.A.</b> Use of deformational models for determination the bearing ability of ferroconcrete flexural elements with corrosive damage of compressed concrete's zone.....	36
<b>Polyakov V.I.</b> Relationship frequency of longitudinal and transverse vibrations test structures oscillation method.....	42
<b>Pyatikrestovskiy K.P.</b> Features of teamwork of thin coverings with a skeleton of wooden spatial designs and calculation of their mutual fastening.....	45
<b>Turkov A.V., Savin S.Y., Boyarkina O.V.</b> Interdependence of the problems cross bending and free oscillations of the beams unlinearly-variable elitude.....	50
<b>Uzunova L.V.</b> On efficiency of application of high-tensile reinforcement in compressed laminated ferroconcrete bars.....	55
<b>Ushakov S.I.</b> Deformation and microcrack formation in axial compression elements from epoxy polymer concrete.....	60
<b>Fyodorov V.S., Mednov E.A.</b> Experimental researches of not cutting two-flying steel beams at not design influences.....	66

### Architecture and town-planning

<b>Kuptsova E.V., Korshunova N.N.</b> System of the factors influencing formation of architectural decisions of eko-settlements.....	69
--	----

### Motor transport, construction site engines, service and repair

<b>Anisimov P. V, Mevlidinov Z.A., Lukashenko M.V.</b> Increase of efficiency of drainage a layer of road clothes.....	76
<b>Aung Mo Heyn.</b> An estimation a deposit of a surface of a ground at проходке tunnels.....	80
<b>Kokodeeva N.E.</b> Definition of service life of road clothes and rates of its destruction taking into account change of humidity of a ground during the settlement period of year (from a position of the theory of risk).....	86

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

УДК 624.1

ИЛЬИЧЕВ В.А., НИКИФОРОВА Н.С., ТУПИКОВ М.М.

## **ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОКЛАДКЕ МЕЛКОЗАГЛУБЛЕННЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ ТОННЕЛЕЙ**

*Подземное строительство в условиях плотной городской застройки приводит к осадкам поверхности существующих зданий и сооружений в зоне влияния строительства. В связи с этим необходимо оценить величину этих осадок, в частности, при сооружении коммуникационных тоннелей мелкого заложения методом щитовой проходки. К коммуникационным тоннелям мелкого заложения относятся тоннели диаметром (D) 3-4 м, глубиной заложения (H) 4-8 м.*

**Ключевые слова:** осадки поверхности, мелкозаглубленные коммуникационные тоннели, коэффициент перебора грунта, эмпирический метод прогноза осадок.

*Underground construction subject to dense city building has an influence on settlements of surface and existing buildings. In this connection it is necessary to estimate these settlements, in particular, in case of construction of shallow service tunnels with tunnel boring machines. Shallow service tunnels are 3-4 m dia and 4-8 m deep.*

**Keywords:** surface settlement, shallow service tunnel, loss of ground, correction coefficients, empirical method for prediction of settlements

Зачастую строительство коммуникационных тоннелей ведется в условиях плотной городской застройки и может приводить к нежелательным осадкам поверхности. Например, при сооружении коммуникационного тоннеля на ул. Грузинский вал (ТПК Lovat RME 163 SE, глубина заложения подземного сооружения 4,0÷8,0 м) в Москве осадки при сооружении инженерного коллектора достигали 70 мм и более. Это повлекло деформации сооружений, расположенных на поверхности.

Реск R.В. и другие авторы (1969 г.) [1, 2] обобщили исследования в области деформаций поверхности при сооружении глубоких тоннелей и описали их эмпирической формулой (1). Позже Clough G.W. и Schmidt В. (1981 г.) [3] предложили ее модификацию. Мы рассмотрели возможности приведенных выше эмпирических подходов [5] к анализу осадок поверхности при сооружении мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей. Эмпирическая формула осадки поверхности над тоннелем, применяемая в этих методах, имеет вид (1):

$$S_v(y) = S_{v,max} \times e^{-\frac{y^2}{2i^2}}, \quad (1)$$

где  $S_v(y)$  – вертикальные перемещения земной поверхности в зависимости от расстояния до оси тоннеля;  $S_{v,max}$  – максимальная вертикальная осадка поверхности (по оси тоннеля);  $y$  – расстояние по поверхности грунта от точки пересечения поверхности с осью тоннеля;  $i$  – значение  $y$  в точке перегиба кривой осадок (зависит от метода).

Сопоставление замеренных осадок поверхности в инженерно-геологических условиях Москвы с вычисленными по эмпирическим формулам указанных методов показало возможность их применения к анализу осадок поверхности при сооружении коммуникационных тоннелей мелкого заложения с учетом поправочных коэффициентов. Однако формула Clough G.W. и Schmidt В. не показывала однотипных отклонений от натуральных наблюдений [5]. Поэтому предварительный прогноз деформаций поверхности при прокладке коммуникационных коллекторов мелкого заложения в Москве рекомендуется выполнять по методу, предложенному

Реск R.B. и др. [1, 2] с корректирующими коэффициентами, установленными АНО АНТЦ РААСН (2007) [4].

В.А. Ильичевым, П.А. Коноваловым и Н.С. Никифоровой (2004 г.) были составлены семь наиболее характерных геологических разрезов для города Москвы, основанных на данных, представленных Мосгоргеотрест (1998 г.) [7].

Для этих типов инженерно-геологических разрезов было исследовано влияние на осадку земной поверхности при прокладке коммуникационных тоннелей различных факторов (глубины проходки тоннеля, типа грунтовых условий, диаметра тоннеля и величины коэффициента перебора грунта), а также были проведены расчеты по эмпирической формуле Реск R.B. и др. [1, 2].

Нами было установлено («Рекомендации...» АНО АНТЦ РААСН (2007 г.)) [4, 6], что для предварительных прогнозов при использовании эмпирической формулы Реск R.B. и др. для коммуникационных тоннелей мелкого заложения к величине максимальной осадки следует применять коэффициент 0,85, а ширина зоны влияния строительства, где необходимо вести геотехнический мониторинг, составляет  $1,2 \dots 2,0 z_0$ , где  $z_0 = H + D/2$ .

Для более точных расчетов с использованием существующего эмпирического метода было необходимо проведение дополнительных исследований для определения поправочных коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  (2) к формуле Реск R.B. и др.:

$$S_v(y) = C_1 \cdot S_{v_{\max}} \times e^{-\frac{C_2 \cdot y^2}{2r^2}}. \quad (2)$$

Нами были рассмотрены экспериментальные данные и данные, полученные с помощью численного моделирования реальных объектов по программе Plaxis.

Данные по рассмотренным объектам сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные, полученные с помощью численного моделирования по программе Plaxis

Начало таблицы 1

№	Объект	Инженерно-геологические условия	$V_L$ , %	H	D	$\chi = H/D$
1	2	3	4	5	6	7
1	Коллектор дождевой канализации на ул. Грузинский вал	Насыпные пески – 0,5 м; пески от пылеватых до крупных, рыхлые и ср. плотности, водонасыщенные – до 12 м; УПВ – 2...4 м	2,6	4	4	1
2	Коллектор дождевой канализации на ул. Грузинский вал	Насыпные пески – до 5 м; пески от пылеватых до крупных, рыхлые и ср. плотности, водонасыщенные – до 12 м; УПВ – 2 м	4,3	4,5	4	1,13
3	Коллектор на п/ст. "Ильинская"	Песок средней крупности со строительным мусором – 2 м; песок средней крупности 1 м, средней плотности, влажный и насыщенный водой, глина пылеватая, полутвердая	5	5,4	3,2	1,69
4	Коммуникационный коллектор «Новобратцево-Войковская». Участок между камерами №5-7	Насыпные пески-3 м; мягкопластичные глины – 2 м; далее пески мелкие; УПВ – 1,5...4 м	1,1	6	3,5	1,71
5	Строительство коллектора от п/ст Угреша	Насыпь – 0,5 м, песок до низа расчетной области; аллювиальные и флювиогляциальные пески средней крупности, крупные и гравелистые, влажные и водонасыщенные, пылеватые и мелкие, влажные, средней плотности	5	5,5	3,2	1,72
6	Строительство коллектора от п/ст Угреша	Насыпь – 1,3 м, песок до низа расчетной области; аллювиальные и флювиогляциальные пески средней крупности, крупные и гравелистые, влажные и водонасыщенные, пылеватые и мелкие, влажные, средней плотности	5	5,77	3,2	1,80

№	Объект	Инженерно-геологические условия	$V_L$ , %	$H$	$D$	$\chi=H/D$
1	2	3	4	5	6	7
7	Строительство коллектора от п/ст Угреша	Насыпь – 2,5 м, песок до низа расчетной области; современные аллювиальные пески мелкие глинистые и пылеватые, водонасыщенные, средней плотности	5	6,07	3,2	1,90
8	Коллектор на п/ст. "Ильинская"	Песок средней крупности со строительным мусором – 2 м; глина пылеватая, полутвердая – 3,8 м; песок средней крупности, средней плотности, влажный и насыщенный водой	5	7,4	3,2	2,31
9	Строительство коллектора от п/ст Угреша	Насыпь – 4,6 м, 0,7 – торф, песок до низа расчетной области; аллювиальные и флювиогляциальные пески средней крупности, крупные и гравелистые, влажные и водонасыщенные, пылеватые и мелкие, влажные, средней плотности	5	7,4	3,2	2,31
10	Коммуникационный коллектор «Новобратцево-Войковская». Участок между камерами №10-13	Насыпные пески – 1,5-2 м; пески средней крупности – 3...4 м; УПВ – 4...5 м	2,2	7	3	2,33
11	Коллектор от п/ст "Золотаревская"	Супесчано-суглинистые грунты насыпного слоя – 6,3 м; суглинок пылеватый мягкопластичный – 1,4 м; песок мелкий средней плотности	3	8,1	3,2	2,53
12	Коллектор от п/ст "Золотаревская"	Супесчано-суглинистые грунты насыпного слоя – 1,5 м; суглинок пылеватый тугопластичный – 1,5 м; суглинок песчанистый мягкопластичный	2	8,4	3,2	2,63

Для условий, описанных в таблице 1, нами были получены осадки поверхности по формуле Реск R.B.

Для сравнения данных натуральных наблюдений и осадок, полученных эмпирическим методом, нами были найдены аппроксимирующие зависимости (рисунок 1) для натуральных данных или полученных численным моделированием по программе Plaxis следующего вида (3):

$$A_v(y) = A \times e^{-By^2}, \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  – параметры, найденные при аппроксимации кривой осадки методом наименьших квадратов.

Осадки поверхности и аппроксимация, полученные для коллектора под железнодорожной насыпью вблизи п/ст Ильинка представлены на рисунке 1.

Введем понятие относительной глубины заложения тоннеля (4) как отношение:

$$\chi = H/D. \quad (4)$$

Для мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей этот параметр варьируется:

$$\chi = 1 \div 2,5.$$

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  были получены полиномиальной аппроксимацией как зависимость от параметра  $\chi=H/D$  на базе натуральных наблюдений и расчетов по конечно-элементной программе Plaxis. Результат аппроксимации (5) в виде графиков представлен на рисунке 2.

$$C_1(\chi) = 1,525 - 1,147 \cdot \chi + 0,353 \cdot \chi^2;$$

$$C_2(\chi) = 1,23 - 0,871 \cdot \chi + 0,212 \cdot \chi^2 \quad (5)$$

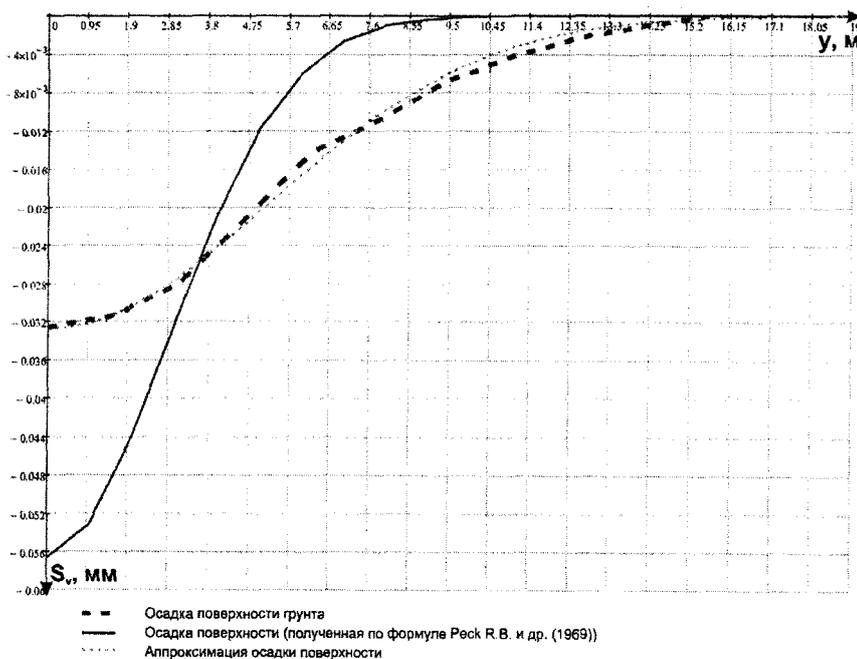


Рисунок 1 – Пример осадки поверхности по данным, полученным по Plaxis, по формуле Реск Р.В. и аппроксимация наблюдений (Объект: коллектор под железнодорожной насыпью вблизи п/ст Ильинка)

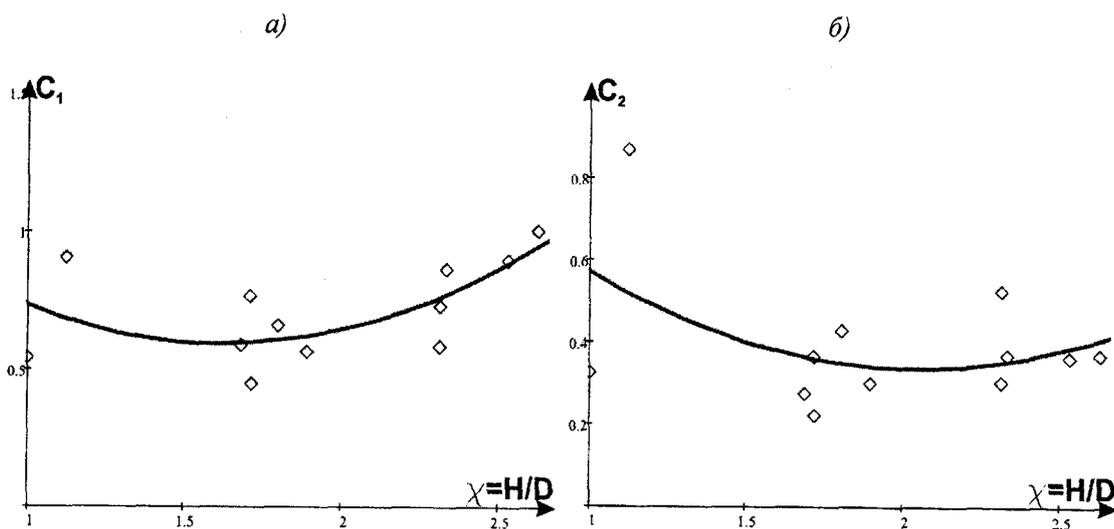


Рисунок 2 – Кривая зависимости функции поправочных коэффициентов, полученная аппроксимацией как функции  $\chi$  для  $C_1$  (а),  $C_2$  (б)

Для удобства использования формул приведем следующую таблицу для  $\chi=1 \div 2,5$  (таблица 2).

Таблица 2 – Значения  $C_1$ ,  $C_2$  при  $\chi=1+2,5$

№	$\chi=H/D$	$C_1$	$C_2$
1	1,0	0,73	0,57
2	1,1	0,69	0,53
3	1,2	0,66	0,49
4	1,3	0,63	0,46
5	1,4	0,61	0,43
6	1,5	0,60	0,40
7	1,6	0,59	0,38
8	1,7	0,60	0,36
9	1,8	0,60	0,35
10	1,9	0,62	0,34
11	2,0	0,64	0,34
12	2,1	0,67	0,34
13	2,2	0,71	0,34
14	2,3	0,75	0,35
15	2,4	0,81	0,36
16	2,5	0,86	0,38

### Выводы

1. Анализ сопоставления натуральных измерений и расчетных величин осадки поверхности при сооружении коммуникационных тоннелей мелкого заложения показал необходимость корректировки эмпирической формулы Peck R.B. и др., рекомендованной для транспортных тоннелей глубокого заложения, имеющих большой диаметр.

2. Приводится таблица поправочных коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ , полученных полиномиальной аппроксимацией как функции параметра  $\chi=H/D$ , к формуле Peck R.B. и др.

3. Получена эмпирическая формула осадки поверхности при прокладке коммуникационных тоннелей мелкого заложения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Peck, R.B. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report [Text] // Proc 7th Int Conf SMFE. – Mexico City, 1969. – P. 147-150.

2. Burland, J.B. Building response to tunneling [Text] / J.B. Burland, J.R. Standing, F.M. Jardine // Case studies from construction of the Jubilee Line Extension. London: projects and methods. – London: Imperial College, CIRIA, 2001. – 344 p.

3. Clough, G.W. & Schmidt, B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay [Text]. In Soft Clay engineering, Brand, E.W. & Brenner, R. eds, 1981. – P. 569-634.

4. Рекомендации «Оценка влияния проходки коллекторов на осадки окружающих зданий и подземных сооружений». – М.: АНО АНТИЦ РААСН, 2007.

5. Ильичев, В.А. Применение эмпирического метода Р.Б. Пека и его модификации для прогноза деформаций поверхности над мелкозаглубленными коммуникационными тоннелями

ми в Москве [Текст] / В.А. Ильичев, Н.С. Никифорова, М.М. Тупиков // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург: [б.и.]. – 2003. – №3(20).

6. Ilyichev, V.A. Prediction of surface deformations, caused by shallow service tunnels construction activities in Moscow [Text] / V.A. Ilyichev, P.A. Konovalov, N.S. Nikiforova, M.M. Tupikov // Proc 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ICSMGE). – Egypt, Alexandria, 2009. – P. 1993-1996.

7. Ильичев, В.А. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях плотной городской застройки Москвы [Текст] / В.А. Ильичев, П.А. Коновалов, Н.С. Никифорова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: [б.и.]. – 2004. – №4. – С. 17-21.

**Ильичев В.А.**

АНО АНТЦ РААСН, г. Москва

Доктор технических наук, профессор, научный руководитель АНО АНТЦ РААСН, г. Москва

Тел.: +7 (499) 747-41-76

E-mail: antc@antcraasn.com

**Никифорова Н.С.**

НИИОСП им. Н.М. Герсванова – филиал ФГУП НИЦ «Строительство», г. Москва

Доктор технических наук, зам. зав. лаб. №2

Тел.: +7 (495) 170-19-27

E-mail: n.s.nikiforova@mail.ru

**Тупиков М.М.**

ООО «Подземпроект», г. Москва

Ведущий инженер

Тел.: +7 (495) 250-75-30

E-mail: tupikov@mail.ru

КАРПЕНКО С.Н.

## МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В КОНЕЧНЫХ ПРИРАЩЕНИЯХ

*Рассматриваются запись физических соотношений в виде связей между приращениями напряжений и деформаций (в инкрементальной форме) с использованием пошаговой линеаризации и методы решения нелинейных разрешающих систем уравнений метода конечных элементов, составленных в приращениях с использованием инкрементальных соотношений. Показано, что при этом метод касательных Ньютона-Рафсона может быть заменен на метод хорд, метод Биргера также претерпевает изменения.*

**Ключевые слова:** приращения напряжений, метод конечных элементов, метод хорд.

*Record of physical relationships in form of relations between increments of stress and strain (in incremental form) with use of step linearization and methods of solution nonlinear solving combined equations of finite-element method, made up in increments using incremental relationships are considered. Presented that at the same time Newton-Rafson's tangent method maybe changed by the chord method, Beerger's method is also changed.*

**Keywords:** increments of pressure, method of final elements, method of chords.

Традиционно физические соотношения для железобетона строятся в виде связей между полными напряжениями и деформациями с использованием секущих модулей [1]. В [2] предложен метод преобразования таких соотношений в связи между приращениями напряжений и деформаций.

Построенная на основе таких соотношений в приращениях разрешающая система уравнений МКЭ требует разработки новых методов ее решения, которые и рассматриваются в данной работе.

### 1. Краткая характеристика получения физических соотношений в конечных приращениях.

Рассмотрим сначала, следуя [2], запись физических соотношений в приращениях на примере одноосной криволинейной диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ . Криволинейная диаграмма на шагах приращений трансформируется в диаграмму в виде ломаной линии. При этом линеаризация выполняется не заранее, а следует из метода решения задачи. Рассмотрим линейный участок между точками  $i$  и  $i+1$ , которые расположены рядом на криволинейной диаграмме (рисунок 1). По секущим модулям  $E_i$  и  $E_{i+1}$  (соответственно для точек  $i$  и  $i+1$ ) можно определить модуль  $E^k$ , связывающий приращения напряжений  $\Delta\sigma = \sigma_{i+1} - \sigma_i$  и приращения деформаций  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i$ , как показано в [2], из рисунка 1 следует:

$$\Delta\sigma = \frac{\varepsilon_{i+1}E_{i+1} - \varepsilon_iE_i}{\Delta\varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon; \quad (1)$$

$$E^k = \frac{\varepsilon_{i+1}E_{i+1} - \varepsilon_iE_i}{\Delta\varepsilon}. \quad (2)$$

С учетом этого зависимость (1) записывается в виде:

$$\Delta\sigma = E^k \Delta\varepsilon. \quad (3)$$

Заметим, что  $E^k$  является касательным модулем применительно к линейному отрезку диаграммы (применительно к ее хорде на шаге линеаризации, отсюда подход относится к варианту метода хорд). По отношению к криволинейной диаграмме  $E^k$  – это секущий модуль на приращении напряжений и деформаций.

Таким образом, получен простой переход от секущих соотношений к инкрементальным на шагах линейризации, который распространен на плоское и объемное напряженное состояние [2].

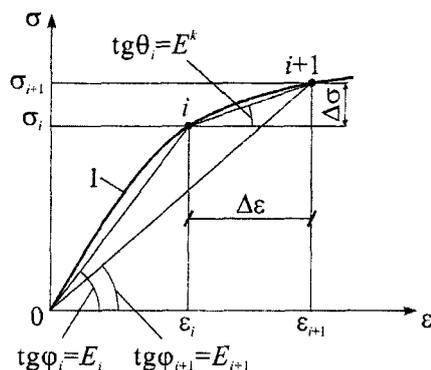


Рисунок 1 – Конечные приращения напряжений ( $\Delta\sigma$ ) и деформаций ( $\Delta\varepsilon$ ) на криволинейной диаграмме (1)

При выводе физических соотношений в приращениях для плоского и объемного напряженных состояний используется аналогичная (1) методика перехода от связей между общими напряжениями и деформациями для сложных напряженных состояний [3]. В таком преобразовании используются физические соотношения между общими напряжениями и деформациями, предложенные в [1]. Так, для плоского напряженного состояния преобразованные по методике [2] общие соотношения [1] в соотношения в приращениях имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^k & d_{12}^k & d_{13}^k \\ d_{12}^k & d_{22}^k & d_{23}^k \\ d_{13}^k & d_{23}^k & d_{33}^k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_{xi+1} - \sigma_{xi} = \Delta\sigma_x; \quad \sigma_{yi+1} - \sigma_{yi} = \Delta\sigma_y; \quad \tau_{xyi+1} - \tau_{xyi} = \Delta\tau_{xy}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xi+1} - \varepsilon_{xi} = \Delta\varepsilon_x; \quad \varepsilon_{yi+1} - \varepsilon_{yi} = \Delta\varepsilon_y; \quad \gamma_{xyi+1} - \gamma_{xyi} = \Delta\gamma_{xy}, \quad (6)$$

$d_{kj}^k$  – касательные жесткости на шаге линейризации  $i \div i+1$ , являющиеся функциями общих жесткостей,  $d_{kj}^{i+1}$  и  $d_{kj}^i$  в виде (2).

Аналогичные соотношения получены для пластин и плоских оболочек в виде:

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_x \\ \Delta M_y \\ \Delta M_{xy} \\ \Delta N_x \\ \Delta N_y \\ \Delta N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^k & D_{12}^k & D_{13}^k & D_{14}^k & D_{15}^k & D_{16}^k \\ & D_{22}^k & D_{23}^k & D_{24}^k & D_{25}^k & D_{26}^k \\ & & D_{33}^k & D_{34}^k & D_{35}^k & D_{36}^k \\ \text{Симметрично} & & & D_{44}^k & D_{45}^k & D_{46}^k \\ & & & & D_{55}^k & D_{56}^k \\ & & & & & D_{66}^k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta k_x \\ \Delta k_y \\ 2\Delta k_{xy} \\ \Delta\varepsilon_{0x} \\ \Delta\varepsilon_{0y} \\ \Delta\gamma_{0xy} \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\{\Delta M_x, \Delta M_y, \Delta M_{xy}, \Delta N_x, \Delta N_y, \Delta N_{xy}\}^T$  – вектор столбец моментов и сил;  $D_{kj}^k$  – коэффициенты матрицы приращения жесткостей на шаге  $i \div i+1$ ;  $\{\Delta k_x, \Delta k_y, 2\Delta k_{xy}, \Delta\varepsilon_{0x}, \Delta\varepsilon_{0y}, \Delta\varepsilon_{0xy}\}$  – вектор столбец кривизн и относительных деформаций срединной поверхности.

Аналогичным образом также устанавливаются связи между приращениями напряжений и деформаций для объемного напряженного состояния:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{yz} \\ \Delta\tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ & & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ & & & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ & & & & d_{55} & d_{56} \\ & & & & & d_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{yz} \\ \Delta\gamma_{zx} \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Соотношения для всех видов КЭ можно обобщенно записать в виде:

$$\{\Delta\sigma^*\} = [d^{*k}] \{\Delta\varepsilon^*\}, \quad (9)$$

где  $\{\Delta\sigma^*\}$  – вектор-столбец напряжений или их обобщенных величин (моментов и сил в плитах и стержнях);  $[d^{*k}]$  – матрица жесткости материала на приращениях напряжений и деформаций при пошаговой линеаризации;  $\{\Delta\varepsilon^*\}$  – вектор-столбец приращений относительных деформаций (или обобщенных относительных деформаций – кривизн и относительных удлинений срединной поверхности в плитах и стержнях).

Исходными при выводе (9) являлись физические соотношения [1], установленные между полными напряжениями и деформациями:

$$\{\sigma^*\} = [a^*] \{\varepsilon^*\}. \quad (10)$$

Разрешающие уравнения МКЭ, построенные с учетом (9) и (10), можно представить в виде:

$$[\bar{K}^k(\Delta\bar{V})] \{\Delta\bar{V}\} = \{\Delta\bar{P}\}; \quad (11)$$

$$[K(\bar{V})] \{\bar{V}\} = \{\bar{P}\}, \quad (12)$$

где  $[\bar{K}(\bar{V})]$  – общая матрица жесткости всей конструкции;  $[\bar{K}^*(\Delta\bar{V})]$  – аналогичная матрица на приращениях нагрузки;  $\{\bar{V}\}, \{\Delta\bar{V}\}$  – соответственно, вектор-столбцы общих перемещений и приращений перемещений;  $\{\bar{P}\}, \{\Delta\bar{P}\}$  – вектор-столбцы общей нагрузки и ее приращений.

Нелинейными компонентами в матрицах  $[\bar{K}(\bar{V})]$  и  $[\bar{K}^*(\Delta\bar{V})]$  являются компоненты нелинейных матриц жесткости материала  $[d^*]$  и  $[d^{*k}]$  отдельных КЭ, которые в итоге зависят от узловых перемещений  $\{\bar{V}\}$  и их приращений  $\{\Delta\bar{V}\}$ .

Решение систем (11) и (12) ищется методами последовательных приближений, которые, однако, существенно различаются. При решении системы (17) значения матрицы  $[K(\bar{V})]$  определяется через полные узловые перемещения на предыдущих шагах, которые отсчитываются от точки «0» начала приложения задаваемой нагрузки  $\{\bar{P}\}_{j+1}$ .

$$[\bar{K}(\bar{V})]_{n-1} \{\bar{V}\}_n = \{\bar{P}\}_{j+1}, \quad (13)$$

где  $n$  – номер этапа приближения.

Метод (13) был предложен И.А. Биргером [4, 5] и носит название «метода переменных параметров упругости» или «метода переменных жесткостей», или метода Биргера. Процедуры этого метода схематически показаны на рисунке 2, а применительно к шаговому нагружению для нагрузки  $\bar{P}_{j+1}$ . Полагая, что ранее (аналогичным образом) определена жесткость в точке  $j$ , которая характеризуется тангенсом угла наклона линии  $0-j$  к оси  $\bar{V}$  (ниже – характеристика наклона). В дальнейших итерациях жесткости изменяются по аналогичным характеристикам наклона линий  $0-1, 0-2$  до достаточного приближения (сходимости) к характеристике наклона линии  $0-j+1$ . Эта жесткость принимается за начальную для следующей ступени нагружения  $j+2$ . При решении системы (11) значение матрицы  $[K(\Delta\bar{V})]$

определяется через приращения перемещений на предыдущей итерации, отсчитываемой от точки  $j$  – начала приращения нагрузки  $\{\Delta P\}_{j+1}$ .

$$[\bar{K}^k(\Delta V)_{n-1}] \{\Delta \bar{V}\}_n = \{\Delta P\}_{j+1}, \tag{14}$$

где  $n$  – номер этапа приближения на данном шаге нагружения  $\{\Delta P\}_{j+1}$ ,  $n = 1, 2, \dots, (j+1)$ .

При  $n = 1$  матрица  $[K^k(\Delta V)_0]$  равна матрице жесткости на предыдущем шаге по нагрузке  $\{\Delta P\}_j$ . Схематически новая процедура (14), которая представляет модификацию метода Биргера применительно к предлагаемой модели расчета в конечных приращениях, показана на рисунке 2, б для шага по нагрузке  $\{\Delta P\}_{j+1}$ . За начальное приращение жесткости этого шага принимается характеристика наклона линии  $j-1 \div j$  на предыдущем шаге  $\Delta P_j$ . По этой жесткости определяется первое приращение перемещений  $\Delta \bar{V}_1$ , а по нему новое значение жесткости на приращениях по характеристике наклона линии  $j \div j+1$  (затем  $j \div 2, \dots$ , до сходимости к наклону линии  $j+1 \div j$ ).

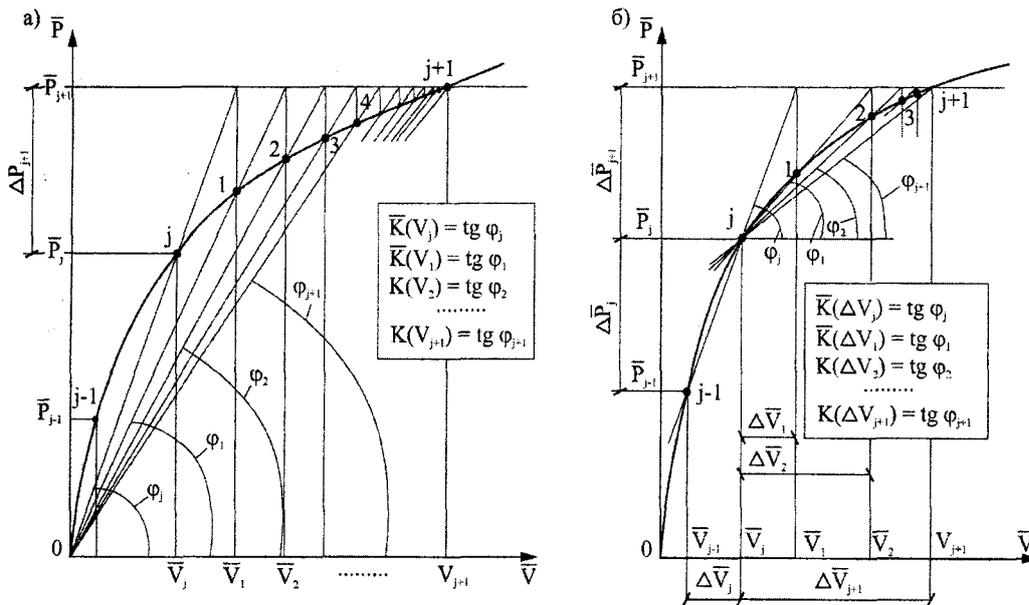


Рисунок 2 – Процедура последовательных приближений на шаге нагружения  $\Delta \bar{P}_{j+1}$ :  
 а – по методу И.А. Биргера при решении разрешающих уравнений МКЭ (12), построенных на основе секущих матриц жесткости материала (10);  
 б – по предлагаемой модификации метода И.А. Биргера применительно к решению разрешающих уравнений МКЭ (11), построенных на основе физических соотношений (9) в приращениях

Эта схема процедур последовательных приближений требует гораздо меньше итераций, чем классический метод Биргера.

Сходимость последовательных приближений можно еще более улучшить, используя процедуру корректирующих последовательных приближений, которая показана на рисунке 3. Она подобна процедуре Ньютона-Рафсона, однако, значительно упрощается в связи с пошаговой линеаризацией. Пусть требуется получить решение для нагрузки  $\bar{P} = const$ , не прибегая к шаговому нагружению (хотя рассматриваемая процедура может применяться в соче-

тании с представленной схемой шагового нагружения). На первой итерации матрица жесткости на приращениях и секущая матрица совпадают:

$$[\bar{K}^k (\Delta V = 0)] = [\bar{K} (V = 0)].$$

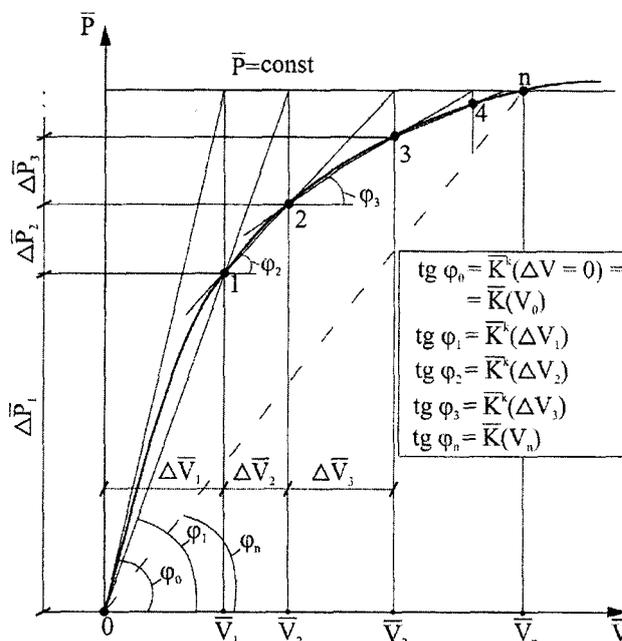


Рисунок 3 – Процедуры корректирующих последовательных приближений

Из решения уравнений  $[\bar{K}^k \{\bar{V}_1\} = \{\bar{P}\}]$  определяются перемещения  $\bar{V}_1 = \Delta \bar{V}_1$ , по этим перемещениям определяется матрица жесткости  $[\bar{K}^k (\Delta V_1)]$  на первом приращении перемещений  $\Delta \bar{V}_1$  (условно характеристика наклона линии 0-1, рисунок 3) и находится нагрузка, соответствующая точке 1:  $\{\Delta \bar{P}_1\} = [\bar{K}^k (\Delta \bar{V}_1)] \{\Delta \bar{V}_1\}$ .

Невязка по нагрузке составит  $\{\bar{P} - \Delta \bar{P}_1\}$ .

Затем из решения системы  $[\bar{K}^k (\Delta \bar{V}_1)] \{\Delta \bar{V}_2\} = \{\bar{P} - \Delta \bar{P}_1\}$  определяются новые приращения перемещений  $\Delta \bar{V}_2$ . По этим перемещениям определяется новая матрица  $[\bar{K}^k (\Delta V_2)]$  (характеристика наклона линии 1-2 на рисунке 3), затем определяется приращение нагрузки, соответствующее  $\Delta V_2$  ( $\{\Delta \bar{P}_2\} = [\bar{K}^k (\Delta V_2)] \{\Delta \bar{V}_2\}$ ), и из решения системы  $[\bar{K}^k (\Delta V_2)] \{\Delta \bar{V}_3\} = \{\bar{P} - \Delta \bar{P}_1 - \Delta \bar{P}_2\}$  определяется новое приращение  $\Delta \bar{V}_3$ , и так до сходимости процесса по  $\bar{V}$  или пока невязка по нагрузке с заданной точностью не приблизится к нулю.

Недостаток такого подхода заключается в том, что могут появиться компоненты невязки, не совпадающие с заданной нагрузкой. Чтобы это исключить необходимо вводить процедуру корректировки невязки  $\{\Delta \bar{P}_i\}$ . Обозначим невязку реальной нагрузкой  $\{\bar{P}\}$  на шаге  $i$  в виде  $\lambda_i \cdot \{\bar{P}\}_i$  и определим из равенства работ на полученных приращениях перемещений значения реального приращения нагрузки и полученной невязки:

$$\lambda_i \{\Delta \bar{V}_i\}^T \{\bar{P}\} = \{\Delta \bar{V}_i\}^T \{\Delta \bar{P}_i\}. \quad (15)$$

Возможен также иной способ устранения неточности невязок на основе пересчета окончательного решения с использованием секущей матрицы  $[\bar{K}(V_n)]$  (она условно характеризуется тангенсом угла наклона  $\varphi_n$  пунктирной линии  $o-n$  на рисунке 3).

Заметим, что условие (15) может использоваться для корректировки и других методов. Так, согласно предложению [4] оно может использоваться для замены многоитерационного метода И.А. Биргера на малоитерационный метод двойственных итераций. При этом на каждом шаге определяется вектор перемещений и соответствующие ему жесткости, а уже по ним (суммируя, левые члены системы уравнений) находится эквивалентный вектор нагрузок, который по условию (15) преобразуется в действительный вектор. Этот подход применительно к схеме (рисунок 2, б) приводит практически к безитерационному методу.

Таким образом, предложены новые более эффективные схемы решения разрешающих уравнений МКЭ, построенных на основе разработанных физических соотношений в приращениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
2. Карпенко, С.Н. О построении общего метода расчета железобетонных плоских конструкций в конечных приращениях [Текст] / С.Н. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2005. – №3. – С. 22-26.
3. Биргер, И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности [Текст] / И.А. Бриггер. – ПММ, 1951. – Т. 15. – Вып.6. – С. 765-770.
4. Карпенко, Н.И. Об учете физической нелинейности при расчете зданий из монолитного железобетона по первой и второй группам предельных состояний [Текст] / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко // Сб. докладов научной сессии «Новые конструктивные решения пространственных покрытий и перекрытий зданий и сооружений». – М.: НИИЖБ, 2005. – С. 29-30.

#### Карпенко С.Н.

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

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве»

Тел.: +7 (495) 482-40-18, 940-39-36.

E-mail: niisf\_lab9@mail.ru.

УДК 624.04

КОРОБКО А.В., КАЛАШНИКОВА Н.Г., МАЛИНКИН Н.С.

## РАСЧЕТ ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ ПЛАСТИНОК С КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ С ПОМОЩЬЮ МИКФ

*Рассматриваются упругие трапециевидные пластинки с комбинированными граничными условиями (любая комбинация условий шарнирного опирания и жесткого защемления по их сторонам). Задачи определения основных частот колебаний таких пластинок решаются с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы.*

**Ключевые слова:** трапециевидная пластинка, коэффициент формы, комбинированные граничные условия, метод интерполяции.

*In this work the elastic trapezoidal plates with the combined (mixed) boundary conditions (the either combinations of the conditions of hinge and rigidly supports to the sides of the plates) are studied. The problems of determination the basic vibration frequency are solved of the method of the interpolation of the coefficient of the form.*

**Key words:** trapezoidal plate, coefficient of the form, combined boundary conditions, method of the interpolation.

Теоретические основы метода интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) разработаны одним из авторов настоящей статьи. Математический аппарат для его применения к решению конкретных задач технической теории пластинок изложен в монографии [1].

### Геометрическая основа МИКФ

В основу МИКФ положены изопериметрические свойства и закономерности изменения интегральной геометрической характеристики формы плоской области (формы пластинок) при ее геометрических преобразованиях. Коэффициент формы области определяется контурным интегралом:

$$K_{fa} = \oint_L \frac{ds}{h}, \quad (1)$$

где  $ds$  – линейный элемент контура области;  $h$  – перпендикуляр, опущенный из произвольной точки  $a$ , взятой внутри области на касательную к переменной точке контура (рисунок 1).

Для любой плоской фигуры с выпуклым контуром существует только единственная точка внутри области, для которой обеспечивается минимальное значение коэффициента формы  $K_f = \min K_{fa}$ . Доказательство этого свойства приведено в монографии [1]. Именно такие значения  $K_f$  будут использоваться в дальнейшем.

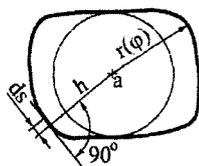


Рисунок 1

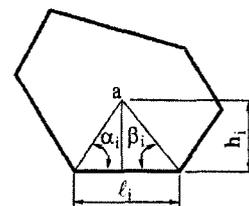


Рисунок 2

Для областей с полигональным контуром (рисунок 2) из выражения (1) получим:

$$K_{fa} = \sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_i) = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_{i-1}), \quad (3)$$

где  $n$  – число сторон многоугольника, а остальные принятые обозначения приведены на рисунке 2. Для трапеций (рисунок 3) из выражения (2) можно получить [1]:

$$K_f = \min \left\{ \frac{1}{K} + \frac{1}{1-K} + \frac{(1-k)^2}{1-K(1-k)} \left[ \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right]^2 \right\} \frac{\operatorname{tg}(\psi/2)}{1-k}, \quad (3)$$

где  $K = h_1/H$ ;  $k = a_1/a_2$ .

Из этого выражения следует: для прямоугольника ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ ,  $a$  и  $b$  – стороны прямоугольника):

$$K_f = 4/(a/b + b/a); \quad (4)$$

для треугольника ( $\alpha, \beta, \gamma$  – углы треугольника):

$$K_f = 2 \operatorname{ctg} \alpha / 2 \cdot \operatorname{ctg} \beta / 2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma / 2. \quad (5)$$

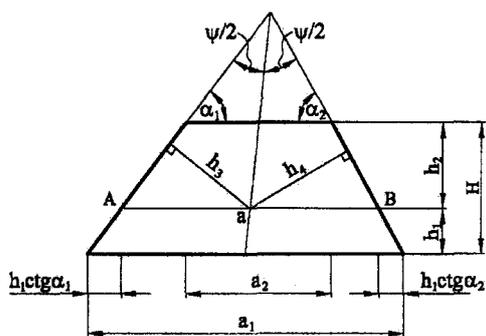


Рисунок 3

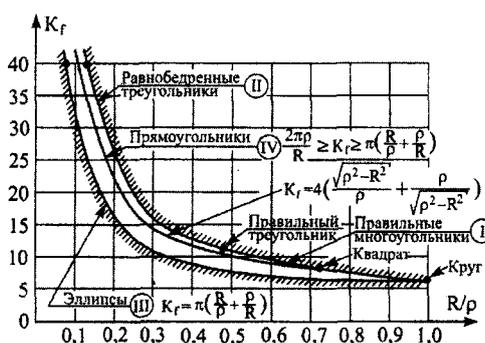


Рисунок 4

Подробные исследования изопериметрических свойств и закономерностей изменения коэффициента формы различных плоских фигур (треугольники, прямоугольники, параллелограммы, трапеции и др.) при разнообразных геометрических преобразованиях проведены в работе [1]. Здесь же используем лишь два из этих свойств коэффициента формы:

– все множество значений коэффициента формы для областей с выпуклым контуром, представленное в виде функции параметра  $R/\rho$  ( $R$  – максимальный радиус вписанной в фигуру окружности,  $\rho$  – минимальный радиус описанной вокруг нее окружности), ограничено сверху значениями  $K_f$  для многоугольников, все стороны которых касаются вписанной окружности, а снизу – значениями  $K_f$  для эллипсов;

– все множество значений коэффициента формы для выпуклых четырехугольников, представленное в виде функции параметра  $R/\rho$ , ограничено сверху значениями  $K_f$  для многоугольников, все стороны которых касаются вписанной окружности, а снизу – значениями  $K_f$  для прямоугольников.

Трапеция является четырехугольной фигурой, поэтому для нее в настоящей статье будет использоваться второе свойство.

### Физическая основа МИКФ

Рассмотрим задачу определения основной частоты колебаний пластинок. В работе [1] доказано, что для граничных условий шарнирного опирания и жесткого защемления пластинок (а также всевозможных их комбинаций) основная частота колебаний пластинок является функцией этих граничных условий и аргумента  $K_f$ :

$$\omega = K_\omega \sqrt{\frac{D}{m} \frac{K_f}{A}}, \quad (5)$$

где  $K_\omega$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида граничных условий пластинки;  $D$  – цилиндрическая жесткость;  $m$  – масса единицы площади;  $A$  – площадь пластинки.

Используя свойство двусторонней ограниченности  $K_f$  трапеций, можно сформулировать следующую изопериметрическую теорему: все множество значений основных частот колебаний равновеликих трапециевидных пластинок, представленное в виде функции аргумента  $K_f$ , ограничено сверху значениями  $\omega$  для пластинок в виде равнобедренных треугольников и квадрата, а снизу – значениями  $\omega$  для прямоугольников.

Целью настоящей статьи и является построение указанных граничных кривых. Для их построения были рассмотрены все возможные комбинации граничных условий шарнирного опирания и жесткого защемления по сторонам для прямоугольных пластинок (9 комбинаций, рисунок 5) и пластинок в виде равнобедренных треугольников (6 комбинаций, рисунок 6).

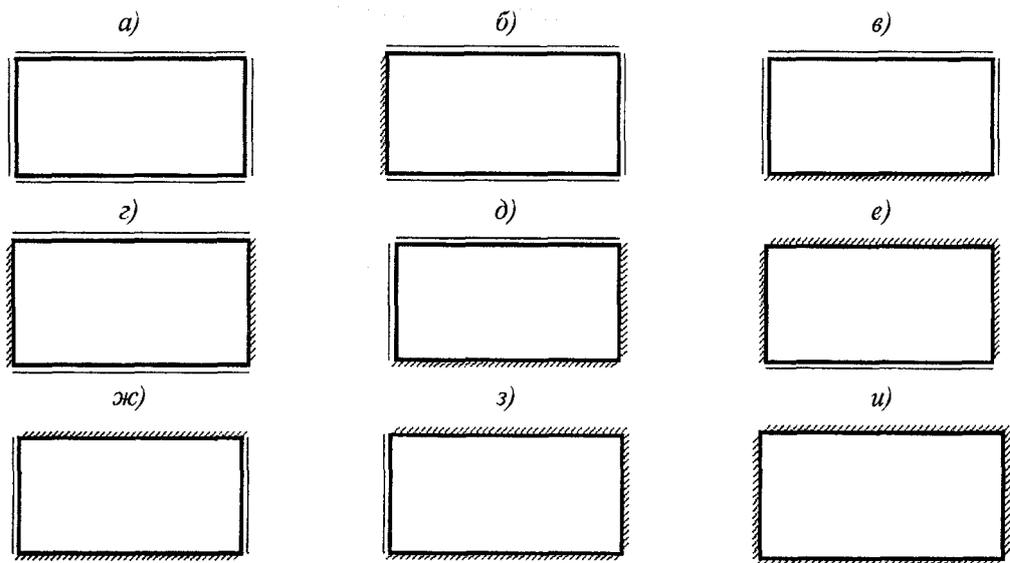


Рисунок 5 – Варианты граничных условий для прямоугольных пластинок

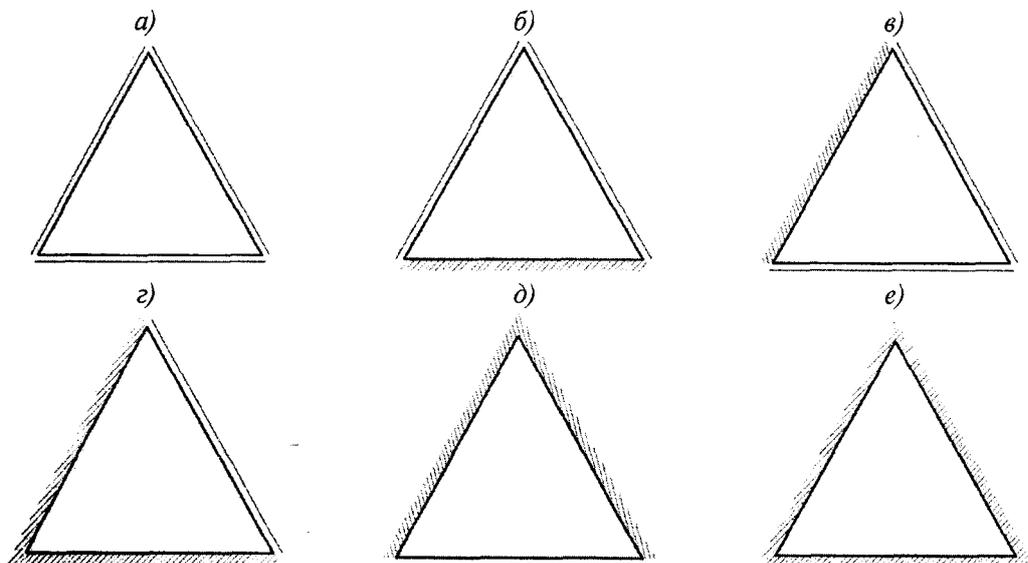


Рисунок 6 – Варианты граничных условий треугольных пластинок

Основные частоты колебаний для прямоугольных пластинок и пластинок в виде равнобедренного треугольника для каждого вида граничных условий подсчитывались с помощью МКЭ с использованием программного комплекса «Лира». Для прямоугольных пластинок назначались соотношения сторон  $a/b$  от 1 до 0,1 с шагом 0,1, для пластинок в виде равнобедренного треугольника принимались углы при основании  $\alpha^{\circ} = 15, 20, 25, 30, 35, 45, 55, 65, 75, 80$ . При выполнении расчетов шаг сетки выбирался  $1/20$  длины меньшей стороны пластинки. Подробные таблицы результатов таких расчетов приведены в диссертационной работе [2]. По этим результатам подбирались аппроксимирующие функции. Как оказалось все эти функции приближенно с точностью до 5% можно описать линейной зависимостью в виде функции:

$$\omega = (a + bK_f) \sqrt{D/m/A}. \quad (6)$$

Поэтому при построении таких прямых для каждой комбинации граничных условий использовались известные решения, приводимые в научной и справочной литературе [3, 4]. Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для рассмотренных схем граничных условий сведены в одну нижеследующую таблицу.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  в аппроксимирующих функциях вида (6)

Схема пластинки	Значения коэффициентов $a$ и $b$		Схема пластинки	Значения коэффициентов $a$ и $b$		Схема пластинки	Значения коэффициентов $a$ и $b$	
	$a$	$b$		$a$	$b$		$a$	$b$
<i>Прямоугольные пластинки</i>								
а)	0,020	2,465	г)	35,150	0,775	ж)	-48,250	9,650
б)	14,880	1,095	д)	-11,020	4,735	з)	-38,99	8,795
в)	-23,272	5,864	е)	8,57	2,850	и)	-16,74	6,59
<i>Пластинки в виде равнобедренного треугольника</i>								
а)	7,836	1,439	в)	11,478	1,639	д)	17,550	1,815
б)	5,297	2,339	г)	9,456	2,588	е)	9,384	3,270

Зависимости (6) для наглядности удобно представлять в виде графиков  $1/\omega - 1/K_f$ . На рисунке 7 такие графики построены для шарнирно опертых по контуру трапециевидных пластинок. Для таких пластинок можно указать двустороннее неравенство:

$$(0,02 + 2,465K_f) \sqrt{D/m/A} \leq \omega \leq (7,836 + 1,439K_f) \sqrt{D/m/A}, \quad (7)$$

где равенства достигаются для квадратной пластинки (кривая I) и для пластики в виде равнобедренного треугольника (кривая II). Кривую II целесообразно было бы описать кривой линией с использованием результата для квадратной пластинки. Это повысит точность граничных кривых, что весьма важно при разработке программного комплекса.

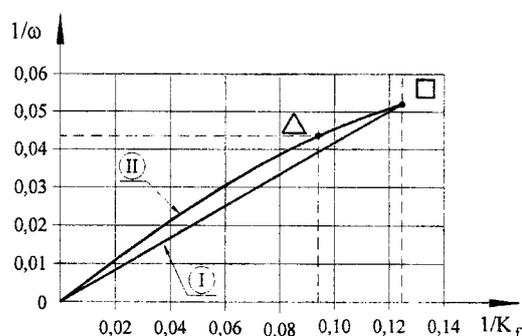


Рисунок 7 – График  $1/\omega - 1/K_f$  для шарнирно опертых по контуру трапециевидных пластинок

**Применение МИКФ**

При использовании МИКФ для решения конкретных задач необходимо для заданной формы пластинки выбрать геометрическое преобразование, при котором из нее образуются прямоугольник и треугольник. Такое преобразование показано на рисунке 8. Вычислив для полученного прямоугольника и треугольника необходимые характеристики (отношение  $a/b$  и  $K_1$  для прямоугольника, угол  $\alpha$  и  $K_2$  для равнобедренного треугольника), по построенным аппроксимирующим граничным функциям находим «опорные» решения (частоты колебаний для прямоугольной  $\omega_1$  и треугольной  $\omega_2$  пластинок). Далее, используя функцию (6), по опорным решениям записываем выражение, которое будет описывать изменение частоты колебаний для всех пластинок, объединенных выбранным геометрическим преобразованием. Подставляя в это выражение значение коэффициента формы для заданной пластинки, найдем ее основную частоту колебаний.

**Пример.** Необходимо найти основную частоту колебаний шарнирно опертой пластинки в виде равнобедренной трапеции с  $\alpha=60^\circ$ , у которой отношение длины нижнего основания к высоте  $a_1/h = 1/0,433$  ( $K_f = 9,950$ ). Решение для заданной пластинки известно и приводится в справочной литературе [4]:  $\omega = 23,40\sqrt{D/m}/A$ .

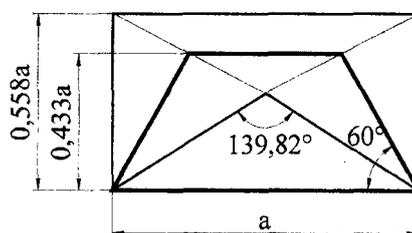


Рисунок 8 – Преобразование прямоугольника в трапецию

Заданную трапецию можно получить из прямоугольника с отношением сторон 1,792 ( $K_f = 9,400$ ) путем его преобразования как показано на рисунке 8. Другой границей будет равнобедренный треугольник с углом при вершине  $139,82^\circ$ . ( $K_f = 23,313$ ). Для граничных (опорных) решений по формуле (7) находим:

$$\omega_1 = 23,191\sqrt{D/m}; \quad \omega_2 = 41,383\sqrt{D/m}.$$

По этим результатам с учетом найденных значений коэффициента формы получим:

$$\omega = (10,912 + 1,307K_f)\sqrt{D/m}.$$

Отсюда для заданной трапециевидной пластинки  $\omega = 23,917\sqrt{D/m}$ , что отличается от известного результата на 2,21%.

Аналогично могут быть решены задачи поперечного изгиба и устойчивости пластинок.

Следует указать, что на точность получаемых с помощью МИКФ решений влияет выбор геометрического преобразования. Вопрос рационального выбора таких преобразования требует проведения специальных исследований.

**Заключение**

1. Для трапециевидных пластинок с комбинированными краевыми условиями (любая комбинация шарнирного опирания и жесткого защемления по сторонам) все множество основных частот колебаний, представленное в координатных осях  $\omega - K_f$ , ограничено с двух сторон: нижнюю граница образуют прямоугольные пластинки с соответствующими краевыми условиями; верхнюю – пластинки в виде равнобедренных треугольников и многоугольников, все стороны которых касаются вписанной окружности.

2. С помощью МКЭ найдены основные частоты колебаний прямоугольных пластинок и пластинок в виде равнобедренных треугольников: для прямоугольных пластинок в диапазоне изменения отношения сторон  $a/b$  от 1 до 0,1, для треугольных пластинок при значениях углов при основании  $\alpha^0 = 15, 20, 25, 30, 35, 45, 55, 65, 75, 80$ .

3. По полученным данным построены аппроксимирующие функции  $\omega(K_j)$ , которые, как оказалось, являются практически линейными зависимостями. С учетом этого вывода и использованием известных точных и приближенных решений, приводимых в научной и справочной литературе, построены уточненные граничные прямые для каждой из возможных комбинаций рассматриваемых краевых условий.

4. Используя эти границы и методику МИКФ [1], можно достаточно просто найти основную частоту колебаний любой трапециевидной пластинки с любой комбинацией краевых условий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 302 с.

2. Сенин, М.А. Определение динамических характеристик пластинок с комбинированными граничными условиями с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / М.А. Сенин // дисс. канд. техн. наук. – Орел, 2009. – 220 с.

3. Гонткевич, В.С. Собственные колебаний пластинок и оболочек [Текст]: Справочное пособие / В.С. Гонткевич. – Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.

4. Справочник по теории упругости [Текст]. – Киев: Будівельник, 1971. – 420 с.

#### **Коробко А.В.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная и теоретическая механика»  
E-mail: oantc@mail.ru

#### **Калашникова Н.Г.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика и САПР»  
E-mail: oantc@mail.ru

#### **Малинкин Н.С.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, докторант кафедры «Прикладная и теоретическая механика»  
E-mail: oantc@mail.ru

КОРОБКО В.И., МОРОЗОВ С.А.

## КРАТКИЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (БАЛОК, ПЛАСТИНОК И ОБОЛОЧЕК) МЕТОДОМ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

*В статье приводится аналитический обзор научных работ по применению метода предельного равновесия для расчета строительных конструкций (балок, пластинок и оболочек). Делается вывод о том, что вопросы расчета строительных конструкций переменной жесткости методом предельного равновесия в научной литературе разработаны недостаточно и необходимы дополнительные исследования в этом направлении.*

*Ключевые слова: предельное равновесие, несущая способность, балка, пластинка, оболочка.*

*In article an analytical review of scientific works on the application of the method of limiting balance for the calculating building constructions (beams, plates and shells) is provided. It is concluded that the issues of calculation of building constructions of variable rigidity by the method of limiting balance is not developed enough in the scientific literature and further research is needed in this direction.*

*Key words: limiting balance, carrying capacity, beam, plate, shell.*

Расчет балок, пластинок и оболочек по методу предельного равновесия в последние десятилетия широко применяется в инженерной практике. В нормах проектирования многих стран разрешается и предписывается применение метода предельного равновесия при расчете конструкций, для которых он уже разработан.

Преимущества этого метода заключаются в том, что он дает возможность определить действительную разрушающую нагрузку путем сравнительно несложного расчета и во многих случаях ведет к значительному экономическому эффекту. Поэтому в настоящее время значительная часть теоретических и экспериментальных исследований направлена на разработку методов для новых видов конструкций или на усовершенствование метода для уже разработанных конструкций.

Основы теории упругих пластинок и оболочек были заложены еще в XIX веке. Широкое использование их в инженерном деле началось в XX столетии с появлением новых строительных материалов, в частности, железобетона.

Линейная теория упругих пластинок и оболочек принимает сложившуюся форму в первой половине прошлого века.

При решении задач, в которых необходимо учитывать запасы прочности тел, теории упругости оказывается недостаточно. Локальный выход за пределы упругости или локальное нарушение прочности, как известно, не всегда приводят к выходу из строя конструкций, изготовленных из пластических материалов, таких как сталь или железобетон. Более правильную оценку прочности в этих случаях дают теории, основанные на моделях пластического [20, 69] или жесткопластического тела [3].

Теория пластинок и оболочек, как раздел теории упругости, позволяет установить распределение напряжений в железобетонных конструкциях в начальные периоды работы, однако, не дает представления о ее действительной несущей способности и запасе прочности. Поэтому для решения этих задач может быть успешно использован расчет по теории предельного равновесия. Метод предельного равновесия особенно подходит для расчета железобетонных конструкций, которым присуще разрушение с образованием дискретных зон пластичности.

Прочность железобетонных элементов по стадии предельного равновесия рассчиты-

вают с 1938 г. Однако усилия для большинства железобетонных статически неопределимых конструкций по-прежнему определяют как для однородного упругого тела. В действительности железобетонные конструкции уже в условиях эксплуатации ведут себя не вполне упруго. В процессе нагружения возрастает число трещин в растянутом бетоне и происходит их дальнейшее развитие, возникают пластические деформации сжатого бетона, нарушается сцепление арматуры с бетоном, арматура в наиболее напряженных участках достигает предела текучести. Эти обстоятельства влияют на общие деформации конструкции и приводят к перераспределению усилий в ней. Наибольшее соответствие расчетного и фактического состояний конструкции, по-видимому, получится, если определять внутренние силы конструкции и рассчитывать ее сечения единообразно – методом предельного равновесия.

Расчет пластинок и оболочек методами теории упругости сложен и громоздок. Расчет пластинок и определение несущей способности оболочек по теории предельного равновесия намного проще.

В связи с этим такой подход к определению несущей способности пластинок получил дальнейшее развитие во многих работах как отечественных, так и зарубежных авторов.

Наиболее интенсивная работа в вопросе разработки методов теории пластинок и оболочек за пределом упругости началась на рубеже 40-х годов прошлого столетия. Большое развитие получила теория пластинок и оболочек с учетом пластических деформаций материала в 60-е годы.

Теория предельного равновесия относится к числу наиболее разработанных, обоснованных и имеющих наибольшее практическое значение разделов современной теории пластичности. Ведущую роль в этом процессе сыграли фундаментальные работы советских ученых А.А. Гвоздева [4], А.Р. Ржаницына, А.А. Ильюшина [20], а также зарубежных ученых В. Прагера [51], Ф.Г. Ходжа [72], А. Надаи [49], Р. Хилла [71], В.Т. Койтера [23] и др.

С момента появления первых работ по теории пластинок и оболочек с учетом пластических деформаций до настоящего времени выдвинуто много новых плодотворных идей, решено большое количество конкретных задач, а также появилась обширная научная литература по этому вопросу [19, 21, 51, 52, 69, 105].

Метод предельного равновесия для расчета железобетонных пластин и оболочек получил серьезное развитие в работах советских ученых А.А. Гвоздева, А.С. Григорьева, А.М. Дубинского, М.И. Ерхова, Д.Д. Ивлева, А.С. Колманка, А.Р. Ржаницына, В.В. Шугаева [3-5, 9-12, 16-20, 24, 25, 59-67, 75-79] и др. Их достижения имеют актуальное значение в наше время и широко цитируются в мировой научной литературе. Из зарубежных исследователей следует отметить работы Э. Митчелла, Ф.Г. Ходжа, В. Ольшака, В. Прагера, Г. Гопкинса, К.В. Йогансена, Е.Н. Мансфилда, М.П. Нилсена [7, 8, 50, 53, 54, 72, 73, 84, 87, 93-95].

При расчете пластинок и оболочек, находящихся в предельном состоянии, определяется ее напряженно-деформированное состояние в момент пластического разрушения. Метод анализа предельного равновесия конструкций получил широкое распространение в связи с тем, что состояние жесткопластического тела определяется в нем конечной комбинацией нагрузок в момент возникновения пластического течения, сам же путь нагружения выпадает из рассмотрения, также как и начальные напряжения и деформации. В этом смысле можно говорить о независимости предельной нагрузки от пути нагружения и начальных напряжений.

Расчет железобетонных плит по линиям излома был впервые предложен А. Ингерслевом в 1921 г., а в более совершенном виде К.В. Йогансеном в 1931 г. [88].

Создание и теоретическое обоснование современного метода предельного равновесия принадлежит выдающемуся советскому ученому А.А. Гвоздеву [4, 5], который еще в 1934 г. сформулировал, а в 1938 г. в работе [3] привел доказательство основных теорем об экстремальных свойствах предельных нагрузок, а также указал на основополагающие принципы, дающие оценки сверху и снизу для несущей способности упруго-пластических систем. Он получил ряд результатов в области расчета пластинок и оболочек по предельному равновесию. В частности, были найдены новые формы разрушения пластинок с криволинейными краевыми шарнирами текучести. Основные теоремы, доказанные А.А. Гвоздевым, получили

дальнейшее развитие в работе А.А. Маркова и, наконец, самое общее доказательство применительно к сплошной среде – в работах Д. Друккера, В. Прагера и Х. Гринберга [15, 82, 83], Ф. Ходжа [72]. Оригинальные доказательства и формулировки экстремальных теорем содержат работы С.М. Фейнберга, Д.Д. Ивлева, М.Ш. Микеладзе [17, 45].

В 1957 г. Е.Н. Мансфилду удалось обобщить задачу о расчете пластинки, шарнирно опертой по двум сторонам, на действие сосредоточенной силы, приложенной в любой точке. Им была получена формула для двусторонней оценки предельной нагрузки для полигонально опертой пластинки, исходя из заданной формы разрушения.

А.М. Дубинский [16, 17] изучает несущую способность пластинок с различным очертанием контура при действии как сосредоточенной силы, так и равномерно распределенной нагрузки. Им установлены критерии схем излома пластинок.

В работе [16] дается анализ предельной несущей способности прямоугольной пластинки при сосредоточенной нагрузке, приложенной в любой ее точке. В зависимости от точки приложения силы могут возникать различные формы разрушения, вследствие этого пластинка оказывается разделенной на несколько зон, каждой из которых соответствует своя формула определения предельной нагрузки.

А.Р. Ржаницыным рассмотрены задачи о несущей способности прямоугольных и полигональных пластинок, а также пластинок с криволинейным свободно опертым, шарнирным и жестко заземленным контуром. В статье [59] А.Р. Ржаницын устанавливает несущую способность прямоугольных шарнирно опертых по контуру пластинок при сосредоточенной нагрузке, приложенной в любой точке пластинки. В работе [62] приводится обобщение полученных им ранее формул для определения предельной нагрузки железобетонных плит на пластинки, материал которых подчиняется условию текучести Мизеса. Определяется предельная нагрузка для круглой шарнирно опертой пластинки. При этом прогиб задается в виде степенной функции от радиуса пластинки. Неизвестный параметр (показатель степени) определяется из условия минимума предельной нагрузки. Показано, что для равномерно распределенной нагрузки и для сосредоточенной силы, приложенной в центре, показатель степени отличен от единицы.

В 1952 г. Н.В. Ахвледиани и В.Н. Шаишмелашвили впервые поставили и решили задачу определения несущей способности пологой железобетонной оболочки положительной гауссовой кривизны на основе теории А.А. Гвоздева. В дальнейшем в институте строительной механики и сейсмостойкости АН ГрузССР под руководством Н.В. Ахвледиани были проведены многочисленные экспериментально-теоретические исследования несущей способности железобетонных оболочек, непосредственно связанные с проектированием реальных конструкций.

Фундаментальные работы А.Р. Ржаницына [64...67] послужили отправной точкой для целого ряда исследований в области предельного анализа оболочек.

В работе [67] для расчета жесткопластических оболочек кинематическим методом А.Р. Ржаницын ввел в рассмотрение идеальную модель сосредоточенных пластических деформаций (цилиндрических шарниров текучести). Основная трудность расчета заключается в отыскании форм разрушения, близких к истинной, и в подсчете работы внутренних сил на соответствующих формах разрушения. Подсчет работы внешних и внутренних сил в случае сосредоточенных деформаций является более простым и хорошо отражает сущность работы железобетона в предельном состоянии после образования трещин.

В работах [64, 65] А.Р. Ржаницын показал, что по линиям перелома смежных жестких дисков наблюдаются лишь сосредоточенные деформации растяжения и сжатия в направлениях, перпендикулярных линиям перелома, и что деформации сдвига по этим линиям отсутствуют как в касательной плоскости оболочки, так и в вертикальной плоскости, проходящей через линию перелома. Отсюда была выведена важная теорема о положении осей взаимного вращения жестких дисков, на которые разделяется пологая оболочка к моменту исчерпания несущей способности.

В работе [66] введено понятие о пространственной стержневой модели для расчета

оболочек. На основе этих исследований приведены формулы для расчета несущей способности пологих прямоугольных и круглых в плане оболочек с шарнирно-неподвижным и подвижным опиранием. Рассмотрен также случай образования кольцевого шарнира текучести в средней части оболочки с разрушением в форме конуса лишь в той части оболочки, которая заключена внутри этого кольцевого шарнира (локальное разрушение).

В работе [65] А.Р. Ржаницын рассмотрел также схему разрушения, характерную для оболочки с произвольным многоугольным планом, и привел формулы для расчета несущей способности.

Теоретические исследования на базе метода предельного равновесия, а также представления о линиях текучести оболочек положительной гауссовой кривизны при различных нагрузках и граничных условиях выполнены Н.В. Ахвледиани, М.Ш. Варваком, Р.Ф. Габбасовым, Б.О. Геворкяном, А.М. Дубинским, А.О. Рассказовым, А.С. Дехтярем, А.К. Ермаковым, Я.Ш. Исхаковым, Л.А. Коробовым, Л.М. Кривелевым, Х.Х. Лаулем, Ю.А. Тярно, А.М. Людковским, А.М. Овечкиным, Г.К. Хайдуковым, Ю.В. Чиненковым, В.В. Шугаевым.

Описанные в большинстве вышеуказанных работ методы являются в основном простыми и приближенными. К недостаткам этих методов относится то, что они, как правило, дают оценку несущей способности сверху. Однако точность этой оценки вполне достаточна для практических целей и может быть компенсирована некоторым снижением показателей прочности материала (что и делается в нормах, вследствие необходимости учета статистического разброса прочностных свойств), а также тем обстоятельством, что схема идеального жесткопластического тела не учитывает упрочнения материала в стадии текучести.

Несущая способность пластинок, материал которых подчиняется условию текучести, изображенному в плоскости моментов границей квадрата (такой вид условия текучести имеет место, например, в случае железобетонных пластинок) исследовалась в работах [24, 60].

О. Холас [73] предлагает метод для исследования предельного равновесия железобетонных пластинок, согласно которому влияние текучести арматуры не рассматривается. Исчерпанием несущей способности плиты считается наличие больших, непрерывно нарастающих деформаций при постоянной величине нагрузки. Указывается, что учет текучести арматуры может оказать значительное влияние на несущую способность пластинки.

В работе [2] проведена экспериментальная проверка несущей способности свободно опертой и шарнирно опертых плит, выяснен вопрос о деформативности плит в упругой области. Исследовались прямоугольные плиты, нагруженные сосредоточенными силами при различных краевых условиях, в том числе смешанного вида. Проведенные эксперименты подтвердили теоретические выводы о характере разрушения и о величинах предельных нагрузок прямоугольных плит при смешанных граничных условиях.

В работах В. Ольшака [50, 94] и других исследователей получены линейные преобразования систем координат, с помощью которых расчет ортотропных пластинок сводится к расчету изотропных пластинок той же несущей способности.

В работе А. Савчука [99] на основании трудов В. Ольшака [94, 96] и других авторов обсуждаются основные положения теории несущей способности пластинок и методы решения задач согласно этой теории. Приводятся таблицы и графики для определения разрушающих моментов прямоугольных пластинок с различными граничными условиями при нагрузках, применяемых на практике, получены коэффициенты ортотропии и слоистости для ортотропных пластинок.

Zd. Sobotka [104] исследовал несущую способность ортотропных прямоугольных жестко защемленных пластинок при действии равномерно распределенной и сосредоточенной нагрузок. Материал пластинок принимается идеально жесткопластическим. Задавая кинематически возможные схемы разрушения в виде системы пластических шарниров, автор получает верхнюю границу предельной нагрузки для прямоугольной защемленной по контуру пластинки при нескольких вариантах загрузки.

Ряд работ советских и зарубежных авторов посвящены определению нижней оценки несущей способности пластинок, которая основывается на статической теореме теории пре-

дельного равновесия. Статический метод предельного равновесия, когда задаются статически возможные распределения внутренних условий, развил в применении к пластинкам М.П. Нилсен [93] в виде так называемого метода узловых точек.

Получить хорошее статическое решение значительно труднее, чем кинематическое. Это объясняется следующими причинами:

- во-первых, необходимо определять поле моментов, удовлетворяющее дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям;
- во-вторых, некоторая комбинация моментов не должна превышать величины, отвечающей пределу текучести;
- в-третьих, интенсивность нагрузки, соответствующая найденному полю моментов, должна обладать максимальными свойствами.

При определении нижней оценки несущей способности пластинок обычно задаются полем моментов в виде некоторых функций, зависящих от параметров [93, 95]. Функции, описывающие поле моментов, стараются выбрать так, чтобы были справедливы уравнения равновесия и краевые условия, если это необходимо. Добавляя сюда условие текучести, то есть дополнительные ограничения на исходные параметры в форме неравенств, и максимизируя интенсивность нагрузки, определяют нижнюю границу несущей способности. Степень приближения полученной оценки к точному значению существенно зависит от вида функций, описывающих поле моментов. В свою очередь, вид функций зависит от типа действующей нагрузки, формы пластинки в плане, типа опирания, что, конечно, существенно ограничивает широкое применение такого подхода.

Основным же недостатком статического метода является необходимость подбора для каждого весьма узкого класса задач функции, описывающей поле моментов. Если даже удастся подобрать такие функции, то для большинства задач статическая оценка оказывается все же неудовлетворительной. Подбираемые функции, как правило, непрерывны в области, ограниченной контуром пластинки. Применение разрывных решений в ряде случаев позволяет улучшить статические оценки.

Совместное применение кинематического и статического методов при расчете одной и той же конструкции позволяют получить двустороннюю оценку интенсивности предельной нагрузки, как это сделано, например, в работе [51]. Это дает возможность судить о точности полученных результатов, а также исследовать интенсивность предельной нагрузки при изменении характерных размеров пластинок. Анализ вышеуказанных работ показал, что верхняя и нижняя оценки могут существенно отличаться друг от друга, то есть заранее нельзя предсказать точность полученного решения. Кроме того, даже в тех случаях, когда верхняя и нижняя оценки несущей способности достаточно близки или даже совпадают, статически допустимое поле напряжений и кинематически допустимое поле скоростей может отличаться от экспериментальных оценок, что не позволяет судить об истинном напряженном состоянии пластинки. Однако в тех случаях, когда требуется определить только предельную нагрузку, такой подход, как можно заключить из результатов некоторых приведенных работ, весьма плодотворен.

В середине 1960-х гг. к задачам о предельной несущей способности пластинок и оболочек был применен аппарат математического программирования [51, 74]. Наибольшее развитие получило линейное программирование, что и определило его широкое использование для решения прикладных задач. В этом направлении следует отметить работы А.Р. Ржаницына, М.И. Рейтмана, Б.В. Мирзабекяна, А.М. Проценко [56], Д.А. Гонгадзе, В.И. Себекиной [68], Д. Купмана и Р. Ланса [44], В. Прагера [98].

При проведении машинных расчетов железобетонных оболочек весьма важным следует признать формулировку условий прочности, близко отображающих реальные свойства железобетона. Здесь следует отметить условия прочности К. Йогансена [88, 89] и А.А. Гвоздева, которые нашли широкое применение при расчете пластин, а применительно к расчету оболочек условия прочности Г.А. Гениева [6], Н.И. Карпенко, К. Морли [90], З. Мруза [91]. Предложенные Н.И. Карпенко условия прочности для общего случая напряженного состоя-

ния железобетонных пластинок и оболочек, учитывающие совместное действие крутящих и изгибающих моментов, а также нормальных и касательных сил, открывают возможность получения полного решения задачи – от упругого до предельного состояния.

Применение методов математического программирования при решении задач предельного анализа интересно тем, что появляется возможность теоретическим путем найти схему разрушения конструкции, которой отвечает действительная величина предельной нагрузки. В 1966 г. А.Р. Ржаницын [61] предложил использовать метод сеток для определения положения возможных шарниров текучести, из которой получались линии шарниров текучести, близкие к действительным. В соответствии с этим методом поверхность оболочки покрывается некоторой сеткой возможных линий разрушений, что превращает оболочку в механизм со многими степенями свободы. Внешняя нагрузка сводится в узлы сетки. Этот способ был впоследствии применен в работах В.И. Терехиной, Г.Н. Брусенцова, А.Э. Боркаускаса. Метод линейного программирования незадолго перед этим получил большое развитие также применительно к расчету упруго-пластических стержневых систем в работах В. Прагера [98] и в особенности А.А. Чираса [74].

В теории предельного равновесия за последнее время достигнуты большие успехи. Применение разрывных решений, переход к ассоциированному закону течения в случае сингулярных условий текучести и совместное рассмотрение полей скоростей и напряжений привели к пересмотру некоторых решений, основанных на чисто статической или чисто кинематической предельных теоремах. Впервые эти идеи нашли отражение в статье Г. Гопкинса и В. Прагера [7], которая посвящена несущей способности круговых пластинок. На решение этой проблемы направлено множество работ, например, [51], в которой исследуются частные случаи предельного равновесия круговых и кольцевых пластинок.

Задачи о несущей способности анизотропных круговых пластинок рассматривались в работе А. Савчука [99-101] и Л.В. Ху [85].

В случае осесимметричных деформаций жесткопластичная задача решается сравнительно легко. Однако, если пластинка имеет произвольную форму, то решение этой задачи крайне затруднительно. Этому вопросу посвящена работа Г. Гопкинса [84], в которой выводятся основные уравнения проблемы в криволинейных координатах. Из решений конкретных задач известны работы В. Шуманна [80, 102] и М. Зейда [106], в которых дается точное решение задачи о несущей способности пластинки с выпуклым контуром под действием сосредоточенной нагрузки.

С задачей предельного равновесия тесно связана задача оптимального проектирования пластинок. Из работ этого направления отметим обзорную статью Р. Шилда [103] и статью Г.И. Коротеева [41], а также работы [8, 11, 36, 53, 92].

Экспериментальной проверкой теоретических исследований метода предельного равновесия занимались многие исследователи [81, 86, 97]. В большинстве своем экспериментальные исследования дают только количественную оценку несущей способности. Качественная сторона явлений по линиям излома (шарнирам текучести) в предельном равновесии не рассматривается.

В 70-е годы прошлого столетия В.И. Коробко при проведении научных исследований сумел развить и адаптировать применительно к задачам предельного равновесия и оптимального проектирования пластинок изопериметрический метод (ИЗПМ), широко используемый в математической физике [29]. С помощью этого метода довольно сложные задачи решаются путем простых геометрических преобразований. При этом получаются выражения, записанные в виде изопериметрических неравенств через геометрические характеристики пластинок. Формулы, описывающие эти решения, имеют ясный физический смысл.

Большое развитие изопериметрический метод приобретает в связи с представляющейся возможностью проектирования пластинок минимального веса (оптимальное проектирование). Причем контур рассматриваемых пластинок может быть произвольным и выпуклым. Ранее известные аналитические решения охватывали, как правило, частные случаи пластинок (круглые, прямоугольные, эллиптические).

Помимо классических задач оптимального проектирования, когда высота на опорном контуре вырождается в нуль, В.И. Коробко рассмотрены задачи, когда высота пластинок в пролете и на опоре ограничена по каким-либо технологическим или конструктивным соображениям. И здесь изопериметрический метод оказался эффективным [30].

Исследованием задач оптимального проектирования пластинок в изопериметрической постановке проводились Г.И. Коротеевым [41]. Им же в соавторстве с В.И. Коробко и И.А. Чаплинским решен целый ряд задач предельного равновесия пластинок переменной жесткости [33, 34, 40, 42]. В статье [42] впервые в теории пластинок было применено преобразование Штейнера к симметризации пластинок переменного сечения относительно их срединной поверхности. При этом была доказана теорема о симметризации таких пластинок. Обобщение этих исследований приводится в кандидатской диссертации Г.И. Коротеева [43].

Последовательное и системное изложение проблемы применения изопериметрического метода в задачах предельного равновесия пластинок приводится в монографии [30], где в частности, рассматриваются и вопросы исследования пластинок, ослабленных отверстиями произвольного вида.

В последние годы А.В. Коробко был предложен новый эффективный инженерный метод решения двумерных задач строительной механики – метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [26, 27], основанный на использовании физико-геометрического подобия интегральных физических характеристик в рассматриваемых задачах технической теории пластинок и интегральной геометрической характеристикой, характеризующую их форму (коэффициент формы  $K_f$ ).

МИКФ получил существенное развитие для задач предельного равновесия пластинок постоянной толщины, связанных с треугольными, параллелограммными и трапециевидными областями в кандидатской диссертации Ю.В. Киржаева [22]. Им обобщены и рассмотрены особенности расчета треугольных, параллелограммных и трапециевидных пластинок кинематическим методом предельного равновесия. Получены расчетные формулы для определения разрушающей нагрузки для указанных видов пластинок с однородными граничными условиями на опорном контуре (шарнирное, свободное опирание и жесткое защемление). Автор сумел доказать, что  $K_f$  является геометрическим аналогом разрушающей нагрузки. С использованием известных и полученных в диссертации решений задач предельного равновесия для треугольных, параллелограммных и трапециевидных пластинок построены кривые, которые ограничивают область возможного изменения разрушающей нагрузки таких пластинок: одна из них соответствует прямоугольным пластинкам, другая – треугольным. Ю.В. Киржаев разработал алгоритм и программный комплекс для определения разрушающей нагрузки для рассматриваемых видов пластинок с помощью МИКФ.

В работах [28, 35] рассматриваются задачи предельного равновесия круглых пластинок радиально-переменной жесткости. В статье [35] с помощью статического метода предельного равновесия получены законченные решения для пластинок, нагруженных осесимметричной нагрузкой, когда вся пластинка в предельном состоянии находится в области пластических деформаций. В работе [28] предлагается методика определения разрушающих нагрузок с использованием предписанных линий уровня поверхности прогибов, которая позволяет достаточно просто определять разрушающие нагрузки для круглых пластинок радиально-переменной толщины. Авторами отмечено, что необходимо проведение дальнейших исследований для распространения этой методики на другие формы пластинок с различными законами изменения толщины.

Работа [14] посвящена оптимальному проектированию квадратных призматических оболочек для случая идеального жесткопластического материала с неодинаковыми пределами текучести при растяжении и сжатии. Учитывается совместное действие двух силовых факторов – осевого сжатия и крутящего момента. Получены решения для определения несущей способности оболочки статическим и кинематическим методами предельного равновесия. Анализ приведенных результатов проектирования показал, что с увеличением сжимающей силы ширина сечения оболочки уменьшается с одновременным ростом толщины стенки.

Увеличение примерно втрое сжимающей силы приводит к такому же удорожанию конструкции. Увеличение крутящего момента при фиксированной сжимающей силе приводит к увеличению ширины сечения оболочки, при этом толщина стенки уменьшается.

В работе [13] рассматриваются задачи определения несущей способности квадратных и прямоугольных пластин из идеального жесткопластического материала с одинаковыми пределами текучести при растяжении и сжатии в случае действия на них нескольких сосредоточенных сил. Приводятся оценки предельной нагрузки, которые позволяют судить о влиянии асимметрии нагружения на несущую способность квадратной пластины в зависимости от положения точек нагружения. Предложена методика, позволяющая рассматривать с единых позиций задачи о любом количестве сосредоточенных поперечных сил, как угодно расположенных на поверхности пластины.

В.В. Шугаев в своей монографии [71] обобщил выполненные им в разные годы исследования по развитию инженерных методов для решения задач несущей способности железобетонных оболочек на основе кинематического метода предельного равновесия в нелинейной постановке. В работе приведены методы определения несущей способности по деформированной схеме для гладких и ребристых железобетонных оболочек с различными очертаниями поверхности и граничными условиями на контуре, нагруженных равномерно распределенной и сосредоточенными нагрузками. Для сложных задач, требующих применения шагово-итерационных методов приведены алгоритмы расчетов, которые могут быть легко запрограммированы. Особое внимание уделено решению задач о несущей способности оболочек по деформированной схеме при локальном разрушении, поскольку такие задачи особенно трудно поддаются решению другими методами, в том числе методом конечных элементов. Большое внимание уделяется экспериментальным методам исследования на моделях и натуральных конструкциях, используется статистическая оценка несущей способности железобетонных оболочек. Все это обеспечивает достоверность полученных результатов.

Необходимо отметить также, что некоторые важные вопросы, относящиеся к рассматриваемой проблеме, в монографии только обозначены и их предстоит решать автору и его последователям в дальнейшем. К ним относится проблема нахождения расчетным путем действительных схем разрушения оболочек, вопросы уточнения деформационных расчетов несущей способности более сложных, сопряженных конструкций оболочек с учетом их конструктивных особенностей и граничных условий на контуре, учет воздействия различного сочетания нагрузок и их влияния на образование схемы разрушения и др.

В последних публикациях В.В. Шугаева [77, 78] рассматриваются задачи определения несущей способности железобетонных пологих сферических оболочек с опорным кольцом, опертых на радиально подвижные опоры, на действие сосредоточенной силы и равномерной нагрузки в геометрически нелинейной постановке. Исследуются схемы разрушения оболочек, выявленные опытным путем. В случае действия на оболочку сосредоточенной нагрузки возможно образование радиальной и локальной схем разрушения, а в случае нагружения оболочки распределенной нагрузкой – радиальной и радиально-кольцевой. Рассматривая последовательность предельных состояний, автор получает расчетные формулы для определения несущей способности.

В работе [76] показано, что расчет гладких и ребристых железобетонных оболочек положительной, нулевой и отрицательной гауссовой кривизны методом предельного равновесия в нелинейной постановке позволяет совместить решение задач прочности и устойчивости в едином расчетном цикле и получить необходимые для проектирования значения несущей способности оболочек и критического прогиба, соответствующего расчетной схеме деформирования, а также провести анализ влияния на несущую способность прочностных и геометрических параметров оболочек с целью выбора оптимального конструктивного решения.

В работе [34] рассматриваются задачи предельного равновесия неразрезных балок ступенчато-переменной жесткости, рационально усиленных изменением жесткости на отдельных участках. В статье показано, что с помощью кинематического метода предельного равновесия можно легко находить предельные нагрузки для той или иной схемы разрушения

неразрезной балки ступенчато-переменной жесткости, а также получать оптимальные параметры усиления, которые будут в этом случае рациональными, так как определяются из условия, что обе схемы разрушения могут реализоваться одновременно.

Задачи предельного состояния стержневых систем (многопролетных балок и рам) с элементами постоянной изгибной жесткости изучены достаточно полно и хорошо представлены в научной и учебной литературе [39, 72]. В то же время работы, посвященные решению задач предельного равновесия стержневых систем с элементами переменной жесткости, практически отсутствуют.

В работе [37] приводится расчет неразрезной балки ступенчато-переменной жесткости, один конец которой жестко заземлен, а другой шарнирно оперт. Рассматривается упругая стадия работы конструкции, а также ее предельное равновесие. Представленный пример расчета балки показал эффективность использования кинематического метода предельного равновесия для расчета конструкций балочного типа. При расчете балки по предельному равновесию можно добиться снижения как материалоемкости самой конструкции, так и увеличения интенсивности равномерно распределенной нагрузки по сравнению с балками, работающими в упругой стадии.

В работе [46] рассматриваются задачи предельного равновесия шарнирно опертых пластинок линейно-переменной толщины с полигональным контуром, нагруженных сосредоточенной силой и равномерно распределенной нагрузкой. По результатам исследований получены следующие выводы:

1. Квадратные пластинки и пластинки в виде правильного треугольника, нагруженные сосредоточенной силой, в случае образования в состоянии предельного равновесия пирамидальной схемы разрушения, эффективнее проектировать линейно-переменной жесткости. Причем существенную роль играет направление оси наибольшего ската пластинки.

2. Квадратные пластинки и пластинки в виде правильного треугольника, нагруженные равномерно распределенной нагрузкой, в случае, когда деформированная поверхность в состоянии предельного равновесия представляет собой пирамиду, выгоднее проектировать постоянной толщины.

3. Результаты, полученные в данной статье, можно также распространить и на пластинки правильной формы.

Как видим из представленного обзора работ по теории предельного равновесия российских и зарубежных авторов, существует еще множество нерешенных вопросов, требующих дальнейшего теоретического и экспериментального изучения поведения пластинок и оболочек под нагрузкой с учетом пластических свойств материала, из которых они изготовлены, что в свою очередь позволит усовершенствовать существующие методы расчета с широким привлечением современных вычислительных комплексов, решить ряд новых и важных задач.

Среди наиболее важных вопросов, требующих решения, следует выделить следующие:

– построение граничных аппроксимирующих кривых для пластинок, принадлежащих к отдельному классу форм (треугольные, параллелограммные, трапециевидные и др.) и нагруженных равномерно распределенной нагрузкой;

– теоретическое и экспериментальное исследование предельного равновесия пластинок переменной жесткости (круглых пластинок радиально-переменной жесткости, а также пластинок с произвольным выпуклым контуром линейно-переменной толщины);

– для круглых пластинок радиально-переменной жесткости решить задачи с заданными (конкретными) законами изменения толщины при осесимметричном нагружении;

– для пластинок линейно-переменной жесткости:

– рассмотреть возможные случаи выхода краевого шарнира текучести на шарнирно опертый контур;

– изучить схемы разрушения полигональных пластинок с образованием криволинейного краевого шарнира текучести в углах полигона;

– рассмотреть схемы разрушения в виде полиэдра при действии равномерно распре-

- деленной нагрузки на пластинки, имеющие полигональное очертание (прямоугольные, трапецеидальные);
- с помощью современных вычислительных комплексов решить дифференциальное уравнение, описывающее положение краевого шарнира текучести с выходом на опорный контур;
- применение изопериметрического метода и метода интерполяции по коэффициенту формы для расчета пластинок постоянной и переменной жесткости, находящихся в предельном состоянии;
- теоретическое исследование предельного равновесия неразрезных металлических балок ступенчато-переменной жесткости, работающих в упругой стадии и находящихся в состоянии предельного равновесия;
- проведение экспериментальных исследований с круглыми пластинками радиально-переменной жесткости, нагруженных сосредоточенной нагрузкой в центре с целью проверки теоретических положений используемых методов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Боровских, А.В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию [Текст]: Учебное пособие / А.В. Боровских. – М.: АСВ, 2004. – 320 с.
2. Варвак, П.М. Исследование прямоугольных плит при смешанных граничных условиях [Текст] / П.М. Варвак, М.Д. Дубинский // Труды II Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. – Львов: Изд-во АН УССР, 1962.
3. Гвоздев, А.А. Определение величины разрушающей нагрузки для статически неопределимых систем, претерпевающих пластические деформации [Текст] / А.А. Гвоздев // Труды конференции по пластическим деформациям АН СССР. – М.-Л.: [б.и.], 1938. – С. 19-30.
4. Гвоздев, А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия [Текст] / А.А. Гвоздев. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.
5. Гвоздев, А.А. Метод предельного равновесия в применении к расчету железобетонных конструкций [Текст] / А.А. Гвоздев // Инженерный сборник. Вып. 1. – М.: [б.и.], 1949. – Т. 5.
6. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона [Текст] / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
7. Гопкинс, Г. Несущая способность круглых пластинок [Текст] / Г. Гопкинс, В. Прагер // Сборник переводов «Механика». – 1955. – №3.
8. Гопкинс, Г. Пределы экономии материала в пластинках [Текст] / Г. Гопкинс, В. Прагер // Сборник переводов «Механика». – 1955. – №6.
9. Григорьев, А.С. Об изгибе круглой плиты за пределом упругости [Текст] / А.С. Григорьев // Труды конференции по пластическим деформациям АН СССР, «Прикладная механика и математика». Вып. 1, 1952. – Т. XVI.
10. Григорьев, А.С. Изгиб круглых и кольцевых пластин переменной и постоянной толщины за пределом упругости [Текст] / А.С. Григорьев // Инженерный сборник. – М.: [б.и.], 1954. – Т. 20.
11. Григорьев, А.С. О плитах равного сопротивления изгибу [Текст] / А.С. Григорьев // Инженерный сборник. – М.: [б.и.], 1959. – Т. 25.
12. Григорьев, А.С. Изгиб круглой защемленной пластинки за пределом упругости [Текст] / А.С. Григорьев // Известия АН СССР отделение технических наук, механики и машиностроения. – 1960. – №6.
13. Дехтярь, А.С. Сосредоточенные нагрузки, приложенные в произвольных точках пластины [Текст] / А.С. Дехтярь // Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение): Сб. статей. Вып. 10. – М.: МОО «Пространственные конструкции», 2006. – С. 24-29.
14. Дехтярь, А.С. К проектированию призматических оболочек [Текст] / А.С. Дехтярь //

Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2008. – №6. – С. 7-9.

15. Друккер, Д. Расширение теоремы о предельном состоянии для непрерывной среды [Текст] / Д. Друккер, В. Прагер, Х. Гринберг // Механика. – 1953. – № (17). – С. 98-106.

16. Дубинский, А.М. Расчет несущей способности железобетонных плит [Текст] / А.М. Дубинский. – Киев: Госстройиздат УССР, 1961. – 483 с.

17. Дубинский, А.М. Расчет несущей способности железобетонных плит и оболочек [Текст] / А.М. Дубинский. – Киев: Будівельник, 1976. – 158 с.

18. Ерхов, М.И. Пластическое состояние оболочек, пластин и стержней из идеально пластического материала / М.И. Ерхов // Известия АН СССР отделение технических наук, механики и машиностроения. – 1980. – №6. – С. 22-35.

19. Ивлев, Д.Д. Теория идеальной пластичности [Текст] / Д.Д. Ивлев. – М.: Наука, 1986. – 221 с.

20. Ильюшин, А.А. Пластичность [Текст] / А.А. Ильюшин. – М.–Л.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.

21. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности [Текст] / Л.М. Качанов. – М.: Изд-во АН СССР, 1969. – 420 с.

22. Киржаев, Ю.В. Развитие и применение метода интерполяции коэффициента формы к решению задач предельного равновесия пластинок / дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Киржаев Юрий Викторович. – Орел, 2005. – 163 с.

23. Койтер, В.Т. Общие теоремы упругопластических тел: Пер. с англ. [Текст] / В.Т. Койтер. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 79 с.

24. Колманок, А.С. К расчету железобетонных плит по методу предельного равновесия [Текст] / А.С. Колманок // Сборник «Исследования по теории сооружений». – М.: Госстройиздат. – 1957.

25. Колманок, А.С. Расчет пластинок: Справочное пособие. [Текст] / А.С. Колманок. – М.: Госстройиздат, 1979. – 207 с.

26. Коробко, А.В. Решение задач предельного равновесия пластинок с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы / А.В. Коробко, В.И. Коробко, Ю.В. Киржаев // Вестник отделения строительных наук / М.: РААСН. – 2004. – С. 273-280.

27. Коробко, А.В. Метод интерполяции по коэффициенту формы в механике деформируемого твердого тела [Текст] / А.В. Коробко. – Ставрополь: Изд-во Ставропольского университета, 1995. – 166 с.

28. Коробко, А.В. Расчет пластинок переменного сечения по методу предельного равновесия [Текст] / А.В. Коробко, Е.В. Семенова, М.О. Калашников // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2006. – №4. – С. 8-12.

29. Коробко, В.И. Изопериметрический метод оценки несущей способности пластинок [Текст] / В.И. Коробко // Пространственные конструкции. – Красноярск. – 1975. – С. 18-21.

30. Коробко, В.И. Геометрические методы расчета пластинок, находящихся в предельном состоянии [Текст]. – Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 1979. – 104 с.

31. Коробко, В.И. Некоторые вопросы расчета пластин переменного сечения методом предельного равновесия / дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Коробко Виктор Иванович. – Новосибирск, 1969. – 140 с.

32. Коробко, В.И. Развитие и применение изопериметрического метода к решению задач строительной механики пластинок / дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.17 / Коробко Виктор Иванович. – Хабаровск, 1982. – 242 с.

33. Коробко, В.И. Использование линий уровня при исследовании предельного состояния пластинок [Текст] / В.И. Коробко, Г.И. Коротеев // Исследования металлических конструкций с профилированными элементами сечений. – Хабаровск: Хабаровский политехнический институт, 1975. – С. 70-77.

34. Коробко, В.И. К вопросу о критериях схем излома пластинок радиально-переменной жесткости [Текст] / В.И. Коробко, Г.И. Коротеев // Исследования металлических

конструкций с профилированными элементами сечений. – Хабаровск: Хабаровский политехнический институт, 1975. – С. 78-83.

35. Коробко, В.И. Статический метод расчета круглых пластинок радиально-переменной жесткости по методу предельного равновесия [Текст] / В.И. Коробко, Е.В. Семёнова, М.О. Калашников // Вестник отделения строительных наук. Вып. 5. – Воронеж-Орел: РААСН, ОрелГТУ, 2006. – С. 97-103.

36. Коробко, В.И. Оптимальное проектирование пластинок ступенчато-переменной жесткости, находящихся в предельном состоянии / В.И. Коробко, С.А. Морозов // Материалы Международных академических чтений «Биосферно-совместимая безопасная среда обитания с позиции архитектурно-градостроительного комплекса». – Брянск: БГИТА, 2007. – С. 39-43.

37. Коробко, В.И. Балка ступенчато-переменной жесткости: расчет в упругой стадии и по предельному равновесию / В.И. Коробко, С.А. Морозов // Материалы Международных академических чтений «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения». – Курск: КурскГТУ, 2009. – С. 85-91.

38. Коробко, В.И. Предельное равновесие неразрезных балок ступенчато-переменной жесткости / В.И. Коробко, С.А. Морозов // «Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2009. – №1/21 (553). – С. 46-50.

39. Коробко, В.И., Коробко, А.В. Строительная механика стержневых систем: Учебник [Текст] / Под редакцией В.И. Коробко. – М.: АСВ, 2007. – 510 с.

40. Коротеев, Г.И. Верхняя оценка предельной нагрузки пластин переменной толщины / Г.И. Коротеев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1978. – №5. – С. 44-49.

41. Коротеев, Г.И. Оптимальное проектирование пластин [Текст] / Г.И. Коротеев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1979. – №7. – С. 34-38.

42. Коротеев, Г.И. Теорема о симметризации пластин переменной толщины / Г.И. Коротеев, И.А. Чаплинский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1977. – №8. – С. 47-48.

43. Коротеев, Г.И. Исследование несущей способности пластин переменной толщины / дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Коротеев Геннадий Иванович. – Новосибирск, 1980. – 122 с.

44. Купман, Д. О линейном программировании и теории предельного равновесия [Текст] / Д. Купман, Р. Ланс // Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. – 1966. – №2. – С. 150-160.

45. Микеладзе, М.Ш. Введение в техническую теорию идеально-пластических тонких оболочек [Текст] / М.Ш. Микеладзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1969. – 181 с.

46. Морозов, С.А. Предельное равновесие шарнирно опертых пластинок линейно-переменной жесткости / С.А. Морозов, В.И. Коробко // «Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2009. – №2/22 (554). – С. 18-27.

47. Мруз, З. Несущая способность кольцевых пластинок. Расчет кольцевых пластинок минимального веса: На польском языке [Текст] / З. Мруз. // Rozpr. inz. – 1958. – №4.

48. Мруз, З. Несущая способность кольцевых пластин, закрепленных по обоим краям [Текст] / З. Мруз, А. Савчук // Известия АН СССР отделение технических наук. – 1960. – №2.

49. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел: Пер. с англ. [Текст] / А. Надаи. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. – 648 с.

50. Ольшак, В. Современное состояние теории пластичности: Пер. с польского [Текст] / В. Ольшак, З. Мруз, П. Пежина. – М.: Мир, 1964. – 389 с.

51. Прагер, В. Теория идеально пластических тел: Пер. с англ. [Текст] / В. Прагер, Ф.Г. Ходж. – М., 1956. – 258 с.

52. Прагер, В. Проблемы теории пластичности [Текст] / В. Прагер. – М.: Физматгиз, 1958. – 136 с.

53. Прагер, В. Проектирование пластин наименьшего веса [Текст] / В. Прагер // Сборник переводов «Механика». – 1956. – № 6. – С. 108-111.

54. Прагер, В. Общая теория состояния предельного равновесия [Текст] / В. Прагер // Сборник переводов «Механика». – 1956. – №6.

55. Проценко, А.М. Предельное равновесие с учетом деформируемой схемы [Текст] / А.М. Проценко // Строительная механика и расчет сооружений. – 1969. – №3. – С. 31-34.
56. Проценко, А.М. Предельное равновесие пологих оболочек [Текст] / А.М. Проценко // Труды VII Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек – М.: Наука, 1970. – С. 513-517.
57. Рассказов, А.О. Предельное равновесие оболочек [Текст] / А.О. Рассказов, А.С. Дехтярь. – Киев: Вища школа, 1978. – 204 с.
58. Рейтман, М.И. Определение несущей способности и минимального армирования железобетонных оболочек методом линейного программирования [Текст] / М.И. Рейтман, Б.В. Мирзабекян // Исследование конструкций зданий и сооружений для сельского хозяйства. Вып. 2. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 93-109.
59. Ржаницын, А.Р. Предельное равновесие прямоугольной пластинки при действии сосредоточенной силы, приложенной в любой точке [Текст] / А.Р. Ржаницын // Сборник статей ЦНИИСК «Исследования по вопросам теории пластичности и прочности строительных конструкций». – М.: Госстройиздат, 1958.
60. Ржаницын, А.Р. Предельное равновесие железобетонных пластинок [Текст] / А.Р. Ржаницын // Известия АН СССР отделение технических наук. – 1958. – №12.
61. Ржаницын, А.Р. Расчет железобетонных плит методом линейного программирования [Текст] / А.Р. Ржаницын // Труды VI конференции по бетону и железобетону (материалы подготовленные ЦНИИСК). – М., 1966. – С. 85-98.
62. Ржаницын, А.Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Наука, 1983. – 288 с.
63. Ржаницын, А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Госстройиздат, 1954. – 287 с.
64. Ржаницын, А.Р. Расчет железобетонных оболочек методом предельного равновесия [Текст] / А.Р. Ржаницын // Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1958. – С. 155-175.
65. Ржаницын, А.Р. Предельное равновесие пологих оболочек [Текст] / А.Р. Ржаницын // Пространственные конструкции в СССР. – М.: Госстройиздат, 1964. – С. 129-137.
66. Ржаницын, А.Р. Пологие оболочки и волнистые настилы (некоторые вопросы теории расчета) [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Госстройиздат, 1960. – 128 с.
67. Ржаницын, А.Р. Приближенные решения задач теории пластичности [Текст] / А.Р. Ржаницын // Исследование по вопросам строительной механики и теории пластичности (материалы подготовленные ЦНИИСК). – М., 1956. – С. 6-65.
68. Себекина, В.И. Кинематический метод определения предельного состояния оболочек с применением линейного программирования / В.И. Себекина // Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – М.: Наука, 1970. – С. 547-550.
69. Соколовский, В.В. Теория пластичности [Текст] / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 606 с.
70. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
71. Хилл, Р. Математическая теория пластичности: Пер. с англ. [Текст] / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
72. Ходж, Ф.Г. Расчет конструкций с учетом пластических деформаций: Пер. с англ. [Текст] / Ф.Г. Ходж. – М.: Машгиз, 1963. – 380 с.
73. Холас, О. О предельном равновесии железобетонных плит [Текст] / О. Холас // Известия АН СССР отделение технических наук. – 1956. – №8.
74. Чирас, А.А. Теория и методы оптимизации упругопластических систем [Текст] / А.А. Чирас, А.Э. Боркаукас, Р.П. Каркаукас. – Л.: Стройиздат, 1974. – 278 с.
75. Шугаев, В.В. Применение нелинейной теории предельного равновесия к расчету несущей способности железобетонных пространственных конструкций [Текст] / В.В. Шугаев // Материалы вторых международных академических чтений «Новые энергосберегающие архи-

тектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий» (20-21 февраля 2003 г.). – М.: РААСН, Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 284-291.

76. Шугаев, В.В. Расчет несущей способности гладких и ребристых железобетонных оболочек методом предельного равновесия в нелинейной постановке [Текст] / В.В. Шугаев, Б.С. Соколов // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2005. – №1. – С. 8-13.

77. Шугаев, В.В. Расчет несущей способности железобетонных пологих сферических оболочек с опорным кольцом на действие сосредоточенной нагрузки в геометрически нелинейной постановке [Текст] / В.В. Шугаев // Вестник отделения строительных наук. Вып. 12. – Белгород: РААСН, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. – С. 241-246.

78. Шугаев, В.В. Расчет несущей способности железобетонных пологих сферических оболочек с опорным кольцом на действие равномерно распределенной нагрузки в геометрически нелинейной постановке [Текст] / В.В. Шугаев // Вестник отделения строительных наук. Вып. 13. – Москва-Орел: РААСН, АСИ ОрелГТУ, 2009. – С. 365-373.

79. Шугаев, В.В. Инженерные методы в нелинейной теории предельного равновесия [Текст] / В.В. Шугаев. – М.: Готика, 2001. – 368 с.

80. Шуманн, В. Об одном изопериметрическом неравенстве в теории пластинок [Текст] / В. Шуманн // Сборник переводов «Механика». – 1959. – №4. – С. 73-78.

81. Baus, R. Calcul a la rupture des deles on beton arme et etude experementable du critere de rupture on flezion pure / R. Baus, S. Tolsceis // Annales I.T.B.T.P. – 1963. – № 163.

82. Drucker, D.G. A more fundamental approach to plastic stress-strain relations [Текст] / D.G. Drucker // Proc. first U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., 1951. – P. 487.

83. Drucker, D.G. Soil mechanics and plastic analysis of limit design [Текст] / D.G. Drucker, W. Prager // Quart. Appl. Mech. – 1952. – N. 10. – P. 157.

84. Hopkins, H.G. The theory of deformation of non-hardening rigid-plastic plates under transverse load [Текст] / H.G. Hopkins // Verformung und Fliessen des Fastkorpers. – Berlin, 1956.

85. Hu, L.W. Design of circular plates based on plastic limit load [Текст] / L.W. Hu // J. Engng. Mech. Div. Proc., Amer. Soc. – 1955. – N. 6.

86. Jaeger, T.N. Experimentale Untersuchungen zur Cranztrafakigkeit von Stahlbatenplatten [Текст] / T.N. Jaeger // Bauingenier. – 1962. – N. 7.

87. Iohansen, K.W. Pladefermler, Formelsamlung. 2 Udgave. [Текст] / K.W. Iohansen. – Kopenhagen, 1956. – 256 p.

88. Iohansen, K.W. Bruchmomente der Kreuzweise Bewehrten Platten [Текст] / K.W. Iohansen // Memories de l'AIPC. – Zurich. – 1932. – V. 1. – P. 565-570.

89. Iohansen, K.W. Yield Line Theory [Текст] / K.W. Iohansen // Cement and Concrete Association. – London, 1962. – P. 152.

90. Morley, C. On yield criterion of an orthogonally reinforced concrete slab element [Текст] / C. Morley // J. Mech. and Phys. of Solids. – 1966. – Vol. 4. – N. 1. – P. 66-80.

91. Mroz, Z. The Load Carrying Capacity of Orthotropic Shells [Текст] / Z. Mroz // Arch. Mech. Stos. – 1960. – N. 12. – P. 85-107.

92. Mroz, Z. On problem of minimum weight design [Текст] / Z. Mroz // Quart. Appl. Mech. – 1961. – N. 2.

93. Nielsen, M.P. Limit analysis of reinforced concrete slabs [Текст] / M.P. Nielsen. – Copenhagen, 1964. – 185 p.

94. Olszak, W. Zagadnienie ortotropii w teorii nosnosci granicznej plyt [Текст] / W. Olszak // «Archiwum Mechaniki Stosowanej». – Praga. – 1953. – N. 5. – P. 75-88.

95. Olszak, W. Zasada ekstremalna w teorii nosnosci granicznej plyt [Текст] / W. Olszak // «Budownictwo». – Praga. – 1956. – N. 6. – P. 32-43.

96. Olszak, W. Z zagadnien podstawowych teorii stanow granicznych w ortotroowych ustrojach plytowych (plastyczne wyczerpaine nosnesi) [Текст] / W. Olszak // Pozpr. Ins., Warszawa. – 1954. – N. 6.

97. Polota's, L. Stahlbetonplatten Versuche und die Bruchtheorie [Текст] / L. Polota's //

Zement und Beton. – 1961. – N. 22.

98. Prager, W. Mathematical programming and theory of structures [Текст] / W. Prager // J. Soc. Indust. and Appl. Math. – 1965. – V. 1. – P. 157-172.

99. Sawczuk, A. O mozliwosciach praktycanego loraystanis z rozwiazan teorii nosnosci graniczney plyt [Текст] / A. Sawczuk // Arch. Ins-ril. Ladawej. – 1956. – N. 2.

100. Sawczuk, A. Same problems of load carrying capacities of orthotropic and non-inhomogeneous plates. [Текст] / A. Sawczuk // Arch. Mech. Stosowanej. – 1956. – N. 4.

101. Sawczuk, A. On the Theory of anisotropic plates and shells [Текст] / A. Sawczuk // Arch. Mech. Stosowanej. – 1960. – N. 2.

102. Schumann, W. On Limit Analysis of Plates [Текст] / W. Schumann // DAM Rept. Brown University, Providence, 1957.

103. Shield, R.T. Plate design for minimum weight [Текст] / R.T. Shield // Quart. Appl. Mech. – 1960. – N. 2.

104. Sobotka, Z. Unesnest votnutych ortotropikych obdelnikovych desek s rovnemernym natizenim u s osamelyni bremeny [Текст] / Z. Sobotka // Stavebn. Casopis. – 1963. – N. 10.

105. Sobotka, Z. Plastica unosnost desek [Текст] / Z. Sobotka // Silnice. – 1956. – N. 5. – P. 17-32.

106. Zaid, M. On the Carrying Capacity of Plates of Arbitrary Shape and Variable Fixity under a Concentrated Load [Текст] / M. Zaid // Appl. Mech. – 1958. – N. 6.

**Коробко В.И.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»

Тел.: +7 (4862) 55-45-64

E-mail: vikor10@mail.ru

**Морозов С.А.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»

Тел.: +7 (4862) 36-87-85

E-mail: morozov\_stas\_57@mail.ru

УДК 624.012:624.046.2

МУРАШКИН Г.В., ПИЩУЛЕВ А.А.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА

*В статье представлена методика определения несущей способности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями сжатой зоны бетона и результаты экспериментальных исследований. Методика основана на использовании деформационной модели и диаграмм деформирования материалов, что позволяет приблизить результаты теоретических исследований несущей способности и напряженно-деформированного состояния к экспериментальным данным.*

**Ключевые слова:** деформативные модели, коррозионные повреждения, изгибаемые элементы.

*The article presents bearing ability determination method of normal sections of ferroconcrete flexural elements with corrosive damage of compressed concrete's zone and results of experimental research. Method is based on usage of deformational models and material warping diagrams which allow bring the theoretic research results of bearing ability and intensive deformed state closer to experimental data.*

**Keywords:** deformational models, corrosive damage, flexural elements.

В последнее время все чаще возникает необходимость оценки состояния железобетонных конструкций, имеющих коррозионные повреждения. Отсутствие нормативных документов делает исследования в этой области особенно актуальными. Изучению влияния агрессивных сред на состояние и несущую способность железобетонных элементов посвящены труды В.М. Бондаренко, Г.А. Гениева, Е.А. Гузеева, В.М. Москвина, В.И. Колчунова, П.Г. Комохова, Е.Г. Пахомовой, А.И. Попеско, В.И. Римшина, Н.В. Савицкого, В.П. Селяева и др. В предлагаемых методиках учет изменения свойств бетона по толщине конструкции осуществляется на основе построения различных диаграмм сопротивления поврежденного и неповрежденного бетона. В большинстве случаев предлагаемые диаграммы носят упрощенный характер и не позволяют приблизиться к наиболее точной оценке напряженно-деформированного состояния (определению несущей способности, фактической высоты сжатой зоны бетона, формы эпюры сжимающих и растягивающих напряжений и т.д.). В некоторых случаях применение упрощенных диаграмм сопротивления бетона может привести к завышенным результатам оценки прочности конструкций.

Препятствием для развития более точных методов расчета до недавнего времени являлось отсутствие методик определения глубины повреждения бетона в конструкции. Предложенный в СГАСУ способ оценки прочностных характеристик бетона [1, 2] и использованный в [3] позволяет оценить прочность бетона конструкции по слоям толщиной до 1-0,5 мм.

Используя данные, полученные предложенным методом, совместно с деформационной моделью конструкции и диаграммой деформирования бетона [4] авторами предложен способ оценки несущей способности и напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов. Предлагаемый метод позволяет определить не только несущую способность поврежденного изгибаемого элемента, но и получить картину напряженно-деформированного состояния нормального сечения в зоне чистого изгиба. На основании предложенной методики расчета был разработан представленный ниже алгоритм расчета.

Исходными данными для расчета являются физико-механические свойства материалов, геометрические характеристики сечения, армирование и схема расположения разно-

прочных слоев бетона. Определив прочностные характеристики бетона по высоте сечения, в нем выделяются условно-однородные слои бетона. Далее, используя экспоненциальную зависимость [4], описываются диаграммы деформирования выделенных слоев бетона. Принятая экспоненциальная зависимость [4] совпадает с диаграммами бетона, предложенными Н.И. Карпенко и Еврокодом с точностью 1-2%, однако, имеет более простую запись (1), что делает ее более удобной при составлении расчетных программ.

$$\sigma_b(\varepsilon) = a_c \cdot \varepsilon^{b_c} \cdot \exp\left(\frac{-b_c \cdot \varepsilon}{p}\right), \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  – напряжение в бетоне;  $\varepsilon$  – относительные деформации бетона;  $a_c$  и  $b_c$  – коэффициенты экспоненциальной функции  $f(\varepsilon) = E$ , описывающей изменение модуля упругости бетона от величины  $\varepsilon$ ;  $p$  – относительная деформация бетона соответствующая на диаграмме максимальной величине напряжений.

Для расчета принята деформационная модель элемента, представленная на рисунке 1.

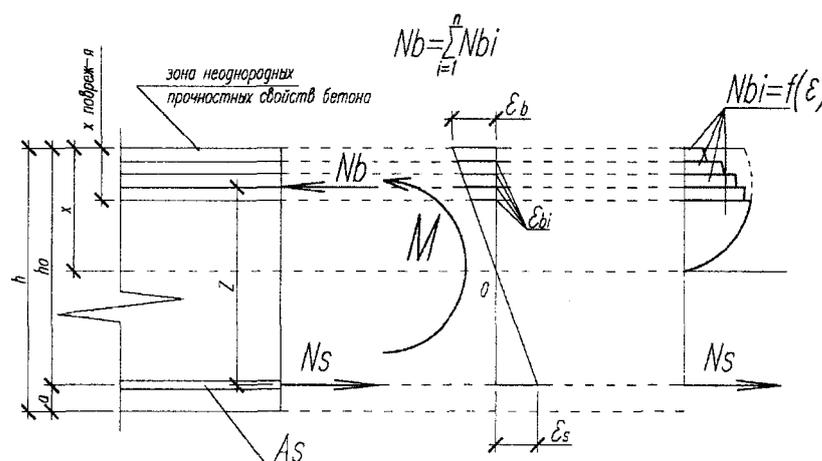


Рисунок 1 – Деформационная модель изгибаемого элемента с неоднородными прочностными свойствами бетона по высоте сечения

Задавшись деформацией бетона у наиболее сжатой зоны бетона, составляем уравнения равновесия внутренних и внешних усилий.

Уравнение проекций внутренних усилий на продольную ось элемента примет вид (2):

$$N_s - N_b = 0, \quad (2)$$

где  $N_s$  – усилие, воспринимаемое арматурой;  $N_b$  – усилие, воспринимаемое сжатым бетоном.

Усилие  $N_s$  определяется в зависимости от уровня деформаций в арматуре. Если деформации в арматуре не достигли предела текучести, то усилие  $N_s$  определяется по формуле (3), в ином случае по формуле (4).

$$N_s = A_s \cdot \sigma_s(\varepsilon_s), \quad (3)$$

где  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры;  $\sigma_s(\varepsilon_s)$  – функция напряжений в арматуре от деформаций;  $\varepsilon_s$  – относительные деформации на уровне центра тяжести сечения растянутой арматуры.

$$N_s = A_s \cdot R_s, \quad (4)$$

где  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры;  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры осевому растяжению.

Усилие  $N_b$  определяется как сумма усилий (5), воспринимаемых бетоном условно-однородных слоев:

$$N_b = \sum_{i=1}^n N_{bi}, \quad (5)$$

где  $N_{bi}$  – усилие, воспринимаемое сжатым бетоном  $i$ -го слоя по формуле (6).

$$N_{bi} = b \cdot \int_{m_i}^{n_i} \sigma_{bi}(x) dx, \quad (6)$$

где  $b$  – ширина прямоугольного сечения изгибаемого элемента;  $\sigma_b(x)$  – функция изменения напряжений в бетоне (7);  $m_i$  и  $n_i$  – нижние и верхние пределы интегрирования, соответствующие нижней и верхней границам соответствующих выделенных слоев, попавших в сжатую зону сечения.

$$\sigma_b(x) = a_c \cdot \left( \frac{\varepsilon_b \cdot x}{k} \right)^{b_c} \cdot \exp \left( \frac{-b_c \cdot \left( \varepsilon_b \cdot \frac{x}{k} \right)}{p} \right), \quad (7)$$

где  $\sigma_b$  – напряжение в бетоне;  $\varepsilon_b$  – относительные деформации у наиболее сжатой грани элемента, полученная в результате перебора;  $x$  – координата рассматриваемой точки сжатой зоны бетона;  $k$  – полная высота сжатой зоны бетона, полученная в результате перебора;  $a_c$  и  $b_c$  – коэффициенты экспоненциальной функции  $f(\varepsilon) = E$ , описывающей изменение модуля упругости бетона от величины  $\varepsilon$ ;  $p$  – относительная деформация бетона, соответствующая на диаграмме максимальной величине напряжений.

Уравнение моментов внешних и внутренних усилий составляется относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры (8):

$$M = N_b \cdot Z, \quad (8)$$

где  $Z$  – плечо внутренней пары сил.

Для определения расстояния между центром тяжести растянутой арматуры и точкой приложения равнодействующего усилия  $N_b$  определялся статический момент эпюры напряжений сжатия бетона и ее площадь.

Площадь эпюры сжатой зоны бетона определяется по формуле (9):

$$A_b = \sum_{i=1}^n A_{bi}, \quad (9)$$

где  $A_{bi}$  – площадь эпюры  $i$ -го слоя, определяемая по формуле (10).

$$A_{bi} = \int_{m_i}^{n_i} \sigma_{bi}(x) dx, \quad (10)$$

где  $\sigma_b(x)$  – функция изменения напряжений в бетоне (7);  $m_i$  и  $n_i$  – нижние и верхние пределы интегрирования, соответствующие нижней и верхней границам соответствующих выделенных слоев, попавших в сжатую зону сечения.

Статический момент эпюры сжатой зоны бетона определяется по формуле (11):

$$S_b = \sum_{i=1}^n S_{bi}, \quad (11)$$

где  $A_{bi}$  – площадь эпюры  $i$ -го слоя, определяемая по формуле (12).

$$S_{bi} = \int_{m_i}^{n_i} \sigma_{bi}(x) x dx. \quad (12)$$

Тогда плечо внутренней пары сил определим по формуле (13):

$$Z = Z^* + \frac{S_b}{A_b}, \quad (13)$$

где  $Z^*$  – расстояние от нулевой линии до центра тяжести растянутой арматуры (14).

$$Z^* = h_0 - x. \quad (14)$$

Для проверки предложенной теории на кафедре железобетонных и каменных конструкций СГАСУ были проведены экспериментальные исследования. В рамках эксперимента было испытано 5 серий по два образца в каждой. Образцы первой и второй серий выполнены однородными, образцы серии 3-5 выполнены многослойными. При бетонировании многослойных балок использовались три типа смеси, которые обладали не только разными прочностными характеристиками, но и подвижностью. По мере укладки смесей в опалубочную форму их подвижность увеличивалась, что позволяло забетонировать балки за один раз без перемешивания слоев. Схематично поперечные сечения представлены на рисунке 2. Прочностные характеристики бетона указаны в кг/см<sup>2</sup>.

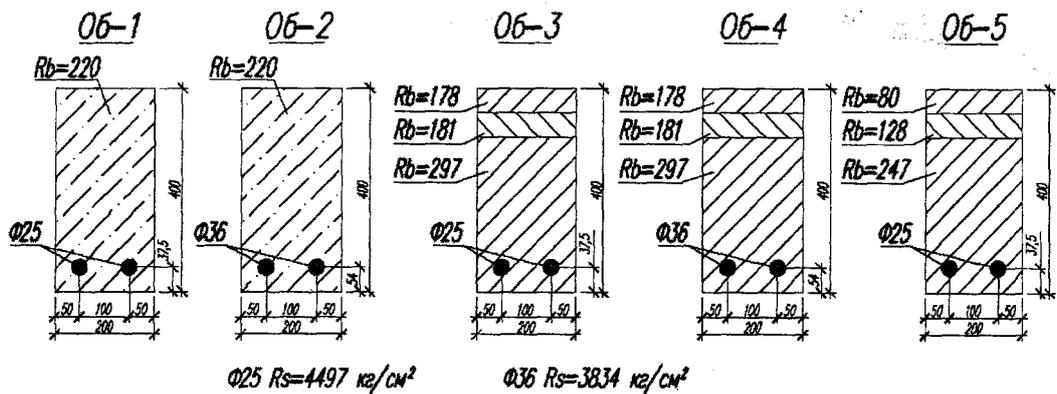


Рисунок 2 – Поперечные сечения балок

При достижении бетона проектных величин прочности балки испытывались в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.

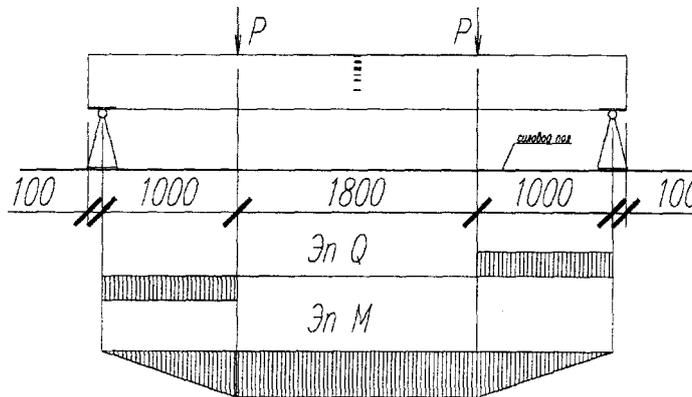


Рисунок 3 – Схема испытания балок

В зоне действия чистого изгибающего момента на рабочую арматуру и боковую поверхность бетона наклеивались тензометрические датчики. Регистрация показаний датчиков выполнялась при помощи тензометрической станции UCAM-65B.

Общий вид испытываемой балки представлен на рисунке 4.

По результатам экспериментальных исследований были получены данные о несущей способности и напряженно-деформированном состоянии нормального сечения балок, представленные в таблице 1.

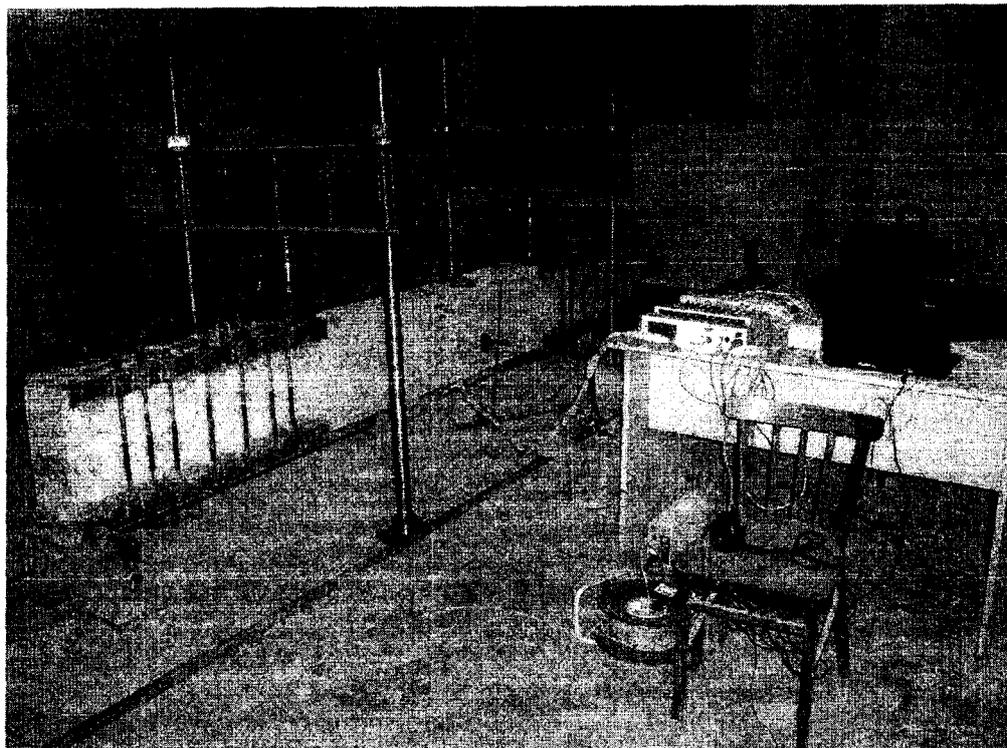


Рисунок 4 – Общий вид испытания балки

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных

Образец	Максимальные деформации в бетоне $E_b \text{ max}$		Высота сжатой зоны бетона, мм		Максимальные деформации в арматуре $E_s \text{ max}$		Несущая способность нормального сечения, кН·м	
	по эксперименту	по методике (отклонение от эксперимента в %)	по эксперименту	по методике (отклонение от эксперимента в %)	по эксперименту	по методике (отклонение от эксперимента в %)	по эксперименту	по методике (отклонение от эксперимента в %)
Об-1.1	0,0031	0,0030 (3.2)	128	122 (4.7)	0,0079	0,0059 (25.3)	135,4	131,4 (3)
Об-1.2	0,0033	0,0030 (9.1)	124	122 (1.6)	0,0055	0,0059 (-7.3)	135,4	131,4 (3)
Об-2.1	0,0036	0,0035 (2.8)	221	223 (-0.9)	0,0024	0,0019 (20.8)	204,4	196,6 (3.8)
Об-2.2	0,0036	0,0035 (2.8)	222	223 (-0.5)	0,0031	0,0019 (38.7)	204,4	196,6 (3.8)
Об-3.1	0,0027	0,0027 (0)	153	154 (-0.7)	0,0029	0,0036 (-24.1)	123,9	123,0 (0.7)
Об-3.2	0,0028	0,0026 (7.1)	146	152 (-4.1)	0,0032	0,0036 (-12.5)	127,7	126,6 (0.9)
Об-4.1	0,0038	0,0035 (7.9)	225	225 (0)	0,0024	0,0019 (20.8)	185,1	181,2 (2.1)
Об-4.2	0,0037	0,0035 (5.4)	222	227 (-2.3)	0,0024	0,0019 (20.8)	188,9	183,7 (2.8)
Об-5.1	0,0035	0,0034 (2.9)	187	186 (0.5)	0,0034	0,0035 (-2.9)	120	118 (1.7)
Об-5.2	0,0036	0,0034 (5.6)	186	186 (0)	0,0036	0,0035 (2.8)	120	118 (1.7)

По результатам сопоставления экспериментальных и теоретических данных можно сделать следующие выводы:

1. Максимальный процент отклонения относительных деформаций у наиболее сжатого волокна, полученных по расчету, составил 9,1%;
2. Процент отклонения высоты сжатой зоны, полученной по расчету, варьируется от -4,1% до 4,7%;

3. Процент отклонения относительных деформаций в растянутой арматуре, полученных по расчету, варьируется от -24,1% до 38,7%;

4. Максимальный процент отклонения теоретической величины разрушающего момента составил 3,8%.

Предлагаемая методика, построенная на использовании в расчете деформационных моделей и диаграмм деформирования фибровых слоев бетона, позволяет с достаточной степенью достоверности оценить несущую способность и напряженно-деформированное состояние поврежденных железобетонных изгибаемых элементов. В перспективе развития данной методики можно получить уточненные результаты при оценке жесткости и трещиностойкости рассматриваемых элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2179722 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N33/38, E 01 N33/38. Способ анализа структуры и прочности бетона в процессе взятия проб из бетонных конструкций методом бурения / В.О. Кричке, Г.В. Мурашкин, Ю.В. Волков, Д.В. Горяинов; заявитель и патентообладатель Самар. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2000105561.

2. Пат. 2198399 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N33/38, N33/38. Информационная система для анализа прочности бетона в процессе взятия проб из бетонных конструкций методом бурения / Кричке В.О., Мурашкин Г.В., Волков Ю.В.; заявитель и патентообладатель Самар. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2000105925.

3. Гаврилов, В.Б. Оценка механических и структурных характеристик бетона в строительных конструкциях методом локального разрушения [Текст]: дис. канд. техн. наук, Южно-уральский государственный университет. – Челябинск, 2004.

4. Мурашкин, Г.В. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы напряженно-деформированного состояния [Текст] / Г.В. Мурашкин, В.Г. Мурашкин // Известия вузов. Строительство. – М.: [б.и.]. – 1997. – №10.

#### **Мурашкин Г.В.**

Самарский государственный архитектурно-строительный университет, г. Самара  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции»  
Тел.: +7 (846) 333-14-23  
E-mail: njkcnsq@bk.ru

#### **Пищулев А.А.**

Самарский государственный архитектурно-строительный университет, г. Самара  
Аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»  
Тел.: +7 (846) 333-56-35, 8-917-117-49-08  
E-mail: pishulev@yandex.ru

ПОЛЯКОВ В.И.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ЧАСТОТЫ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ВИБРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

*Предлагается способ контроля качества плит дорожного покрытия с помощью вибрационного метода и использованием продольных колебаний. Приводятся результаты испытаний 4-х плит, которые подтверждают теоретические положения вибрационного метода.*

*Ключевые слова:* декремент колебаний, вибрационный метод, продольные колебания, резонансная частота.

*The way of quality assurance of plates of a road covering by means of a vibrating method and with use of longitudinal fluctuations is offered. Results of tests of 4 plates which confirm theoretical positions of a vibrating method are resulted.*

*Keywords:* decrement of fluctuations, vibrating method, longitudinal fluctuations, resonant frequency.

Современные методы контроля качества железобетонных конструкций широко применяются для исследования их физико-механических характеристик как при изготовлении, так и в период эксплуатации. Из всего объема продукции, выпускаемой предприятиями строительной индустрии, сборные железобетонные конструкции являются наиболее распространенными. Поэтому проблема контроля качества и надежности выпускаемой продукции остается актуальной. Регламентируемые ГОСТ 8829-94 статические испытания железобетонных конструкций проводятся в заводских условиях с целью установления их основных параметров качества: прочности, жесткости и трещиностойкости. Такие испытания проводятся на определенной выборке из партии изделий, по результатам которых судят о качестве всей партии. Основными недостатками этого метода являются: отсутствие гарантии надежности и качества всех неиспытанных изделий из контрольной партии, нетехнологичность и неэкономичность метода, требующего разрушения большого количества изделий.

Неразрушающие методы контроля, в частности, вибрационные, позволяют избавиться от недостатков, присущих разрушающим методам контроля. Но, несмотря на очевидные преимущества и определенные достижения в развитие этих методов, в настоящее время они не находят должного применения на предприятиях строительной индустрии. Кроме того, в нашей стране отсутствует стандарт на применение вибрационных методов для контроля физико-механических характеристик и оценки качества строительных конструкций. Одной из основных причин такого положения является отсутствие надежной методологической базы, основанной на фундаментальных закономерностях строительной механики. Также установлено, что на характеристики прочности, жесткости и трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных конструкций существенное влияние оказывает величина предварительного напряжения арматуры. Хотя это не единственный фактор, в той или иной степени влияющий на качество готовой продукции, его можно рассматривать как важнейший. Однако до настоящего времени не разработаны эффективные экспериментальные методы определения величины преднапряжения арматуры в готовом изделии. Метод прямого тензометрирования арматуры не может быть использован в массовом производстве ввиду его большой сложности и трудоемкости. Магнитометрический способ позволяет определить напряжение в свободной (не забетонированной) арматуре. Поэтому совершенствование и применение вибрационных методов для контроля прочностных, деформативных показателей и интегральной оценки величины предварительного напряжения арматуры железобетонных конструкций, изучение и уточнение взаимосвязей контролируемых па-

раметров качества с вибрационными характеристиками конструкций является актуальной задачей, имеющей важное хозяйственное значение.

В работах В.И. Коробко [1] была установлена закономерность, связывающая величину максимального прогиба  $w_0$  с основной частотой колебаний упругой однопролетной балки  $\omega$ :

$$w_0 \omega^2 = 1,279q/m \approx 4/\pi \cdot q/m, \quad (1)$$

где  $q$  – распределенная нагрузка;  $m$  – погонная масса балки.

Произведение  $w_0 \omega^2$  в выражении (1) не зависит от изгибной жесткости балки и поэтому применимо для железобетонных плит, изготовленных с различной степенью натяжения арматуры и работающих в упругой стадии под действием кратковременной нагрузки.

Используя известные из технической литературы зависимости для определения основной частоты колебаний балок при продольных и поперечных колебаниях и закономерность (1), получено выражение, связывающее частоту продольных и поперечных колебаний:

$$\omega_{np} = \omega_{из} \frac{\ell}{\pi} \sqrt{\frac{A}{I}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{np}$  и  $\omega_{из}$  – резонансные частоты продольных и изгибных колебаний;  $I$  – момент инерции сечения;  $A$  – площадь сечения.

Таким образом, возможность использования продольных колебаний для контроля качества железобетонных конструкций, предложенная Г.Н. Слюсарева и А.А. Павленко [2, 3], получает теоретическое обоснование.

Используя закономерность (1), получаем выражение для определения максимального прогиба балочных конструкций по частоте продольных колебаний:

$$w_0 = 1,268 \cdot \frac{q}{m} \cdot \left(\frac{l}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{EA}{EI} / \omega_{np}^2, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости.

Это выражение позволяет судить о жесткости конструкции.

Для проверки этих положений проводились испытания плиты дорожного покрытия в режиме продольных колебаний. При этом пригодность серийной конструкции к эксплуатации осуществлялось также путем сравнения значений ее параметров (частоты  $f$  и декремента колебаний  $\delta$ ) с соответствующими параметрами для эталонной железобетонной плиты.

Графическое представление результатов испытаний плит дорожного покрытия в режиме продольных колебаний показано на рисунках 1 и 2. На графиках цифрами 1, 2 и 3 обозначены соответственно характеристики плит №1, №2 и №3.

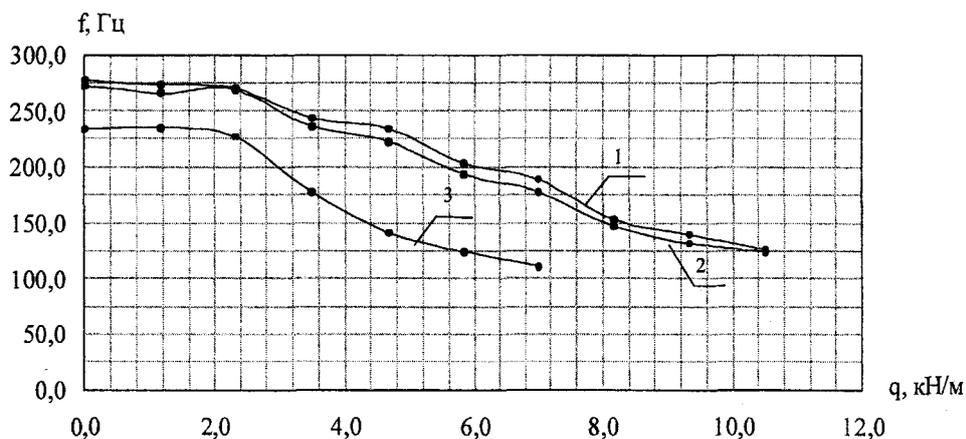


Рисунок 1 – График зависимости резонансной частоты продольных колебаний от интенсивности поперечной нагрузки

Анализируя эти графики, приходим к выводу, что из трех рассматриваемых конструкций наименее добротной является дорожная плита №3, изготовленная с натяжением 50% арматурных стержней. У нее для всех ступеней прикладываемой нагрузки  $q$  резонансная частота  $f$  ниже, а декремент колебаний  $\delta$  выше аналогичных параметров других плит, применяемых в качестве эталонных образцов (плиты №1 и №2). Плиты №1 и №2 по своим характеристикам отличаются друг от друга незначительно.

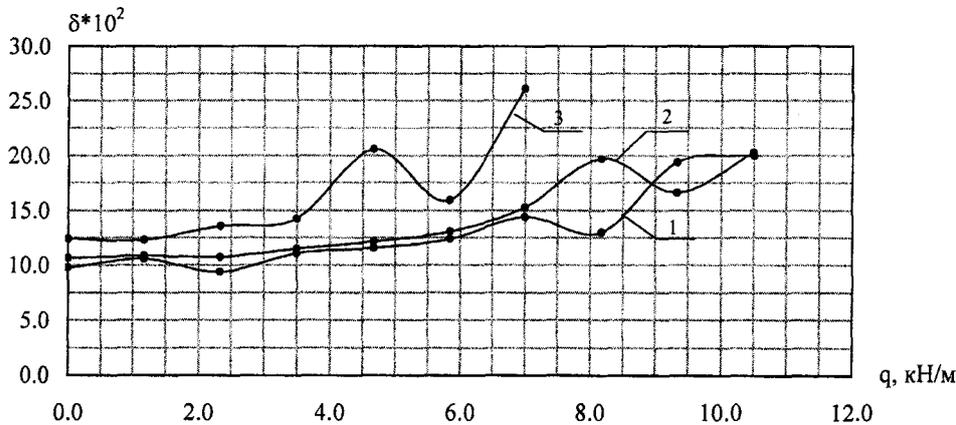


Рисунок 2 – График зависимости декремента затухания продольных колебаний от интенсивности поперечной нагрузки

Также необходимо отметить, что достаточно монотонный рост декремента колебаний при действии на плиту распределенной нагрузки, не превышающей контрольную нагрузку по трещиностойкости, нарушается при действии нагрузки, превышающей эту величину (рисунок 2). В связи с этим не рекомендуется использовать декремент колебаний в качестве критерия, для контроля качества плит.

Предложенный метод вибрационного контроля по сравнению с существующими в настоящее время методами статических испытаний позволяют не только снизить трудоемкость контроля в целом, но и повысить достоверность результатов при распространении их на всю контролируруемую партию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: АСВ, 1997. – 396 с.
2. Слюсарев, Г.Н. Модифицированный вибрационный метод интегральной оценки качества железобетонных изделий с применением продольных колебаний [Текст] / Г.Н. Слюсарев // Известия вузов. Строительство. – М.: [б.и.]. – 1995. – №5-6. – С. 122-125.
3. Павленко, А.А. Развитие и совершенствование вибрационного метода контроля качества предварительно напряженных изгибаемых железобетонных конструкций в виде плит. Диссертация канд. техн. наук, Орел, 2000.

**Поляков В.И.**

Орловский государственный технический университет, г. Ливны  
E-mail: oantc@mail.ru

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ К.П.

## ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТОНКИХ ОБШИВОК С КАРКАСОМ ДЕРЕВЯННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РАСЧЕТ ИХ ВЗАИМНОГО КРЕПЛЕНИЯ

*Описаны особенности совместной работы тонких обшивок с каркасом деревянных пространственных конструкций и расчет их взаимного крепления. Показано, что тонкие обшивки оболочек, объединяющие систему ребер в пространственную конструкцию, могут работать после наступления местной потери устойчивости. При этом критические напряжения сдвига могут быть превышены в 4-5 раз.*

**Ключевые слова:** оболочки, обшивка, местная потеря устойчивости.

*Features of teamwork of thin coverings with a skeleton of wooden spatial designs and calculation of their mutual fastening are described. It is shown, that the thin coverings of covers uniting system of edges in a spatial design, can work after approach of local loss of stability. Thus critical pressure of shift can be exceeded in 4-5 times.*

**Keywords:** covers, a covering, local loss of stability.

Задачи массового жилищного, гражданского и промышленного строительства, стоящие перед нашей страной, требуют экономного расходования всех строительных материалов, повышения качества строительства и обеспечения конструктивной безопасности сооружений.

Этим требованиям отвечают относительно легкие пространственные конструкции из древесины – одного из традиционных материалов в России и за рубежом.

Расширяется применение в строительстве стеклопластиков и других полимерных материалов, обладающих высокой прочностью. Они могут в качестве тонких обшивок успешно сочетаться с каркасом из древесины.

Имеется много нерешенных вопросов обеспечения надежной работы таких комплексных конструкций, где материалы используются наиболее рационально.

В частности, жесткие элементы каркаса могут объединяться тонкими гибкими обшивками в пространственные многократно статически неопределимые системы, обладающие высокой живучестью за счет перераспределения внутренних усилий. При этом конструкции могут воспринимать различные запроектные нагрузки типа сейсмических, взрывных и других техногенных и природных воздействий.

Ниже приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективных конструкций в виде оболочек, в которых сложное напряженное состояние проявляется наиболее ярко и требуется совместная работа всех элементов конструкции с полным использованием возможностей их силового сопротивления при любых сочетаниях нагрузок.

Одним из наиболее хорошо изученных материалов для обшивок оболочек является фанера, которую до середины прошлого века использовали для устройства фюзеляжей самолетов. Здесь фанерные обшивки объединяют элементы силового набора (каркаса из ребер). Обшивки при этом работают преимущественно на сдвиг. При определенных нагрузках происходит местная потеря устойчивости листов фанеры с образованием волн или вмятин на поверхности. Было замечено, что при нагрузках, далеко превосходящих проектные, фанера уже с явными признаками местной потери устойчивости продолжает воспринимать нагрузки, особенно растягивающие, а при снятии нагрузок волны и вмятины на поверхности исчезают и возможно многократное приложение к конструкции запроектных нагрузок. При соответствующем обосновании можно также допустить возникновение местной потери устойчивости при расчетных нагрузках. При этом достигается существенная экономия материалов. Это

свойство обшивок используется и в современных авиационных, других конструкциях из легких материалов, где снижение их собственного веса имеет большое значение.

Расчет обшивок оболочки после местной потери устойчивости сложен и авторы работ по оболочкам авиационного применения, например, [2], предложили ряд эмпирических зависимостей для определения критических напряжений сдвига по контуру участков обшивок, испытывающих местную потерю устойчивости (таблица 1).

Таблица 1 – Эмпирические зависимости для определения критических напряжений сдвига по контуру участков обшивок, испытывающих местную потерю устойчивости

Теоретические оценки критических напряжений сдвига	Значение критических напряжений сдвига в обшивке			
	По результатам загрузки модели		По результатам экспериментов Ромашевского А.Ю., Зотова А.Ф. [2]	
	экспериментальные	теоретические	экспериментальные	теоретические
1	2	3	4	5
Геометрические размеры оболочки и упругие характеристики обшивки	$R = 98,8 \text{ см}; l = 600 \text{ см};$ $\delta = 0,4 \text{ см}; \delta/R = 4 \cdot 10^{-3};$ $a = 36,6 \text{ см}; \sigma = 64,0 \text{ см};$ $E_{\text{эф}} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ МПа};$ $G = 0,75 \cdot 10^3 \text{ МПа}$		$R = 40,0 \text{ см}; l = 250 \text{ см};$ $\delta = 0,25 \text{ см}; \delta/R = 6 \cdot 10^{-3};$ $a = 20,0 \text{ см}; \sigma = 45,0 \text{ см};$ $E_{\text{эф}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ МПа};$ $G = 0,893 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	
1. Полуэмпирическая зависимость для подкрепленных оболочек (по Авдонину А.С. [5])	$\tau_{\text{кр}} = 0,1E \cdot \frac{\delta}{R} + 5E \left(\frac{\delta}{a}\right)^2$			
	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 1,6 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 5,01 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 3,4 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 1,11 \text{ МПа}$
2. Для защемленной по контуру цилиндрической панели, при $\mu = 0,3$ [6]	$\tau_{\text{кр}} = 0,1E \cdot \frac{\delta}{R} + 7,5E \left(\frac{\delta}{a}\right)^2$			
	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 1,6 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 6,86 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 3,4 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 14,2 \text{ МПа}$
3. Для пластики из фанеры, все стороны которой оперты и волокна рубашки параллельны длинным сторонам (по Сахару-Зельковичу Я.И. [4])	$\tau_{\text{кр}} = 10^4 \cdot \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \cdot K, \quad c = \frac{a}{\delta} > 1$			
	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 1,6 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 1,78 \text{ МПа}$ $K = 14,98; c = 1,85$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 3,4 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 2,02 \text{ МПа}$ $K = 12,93; c = 2,25$
4. Для гладкой замкнутой круговой цилиндрической оболочки при чистом сдвиге (по Кломп ) [3]	$\tau_{\text{кр}} = 10^4 \cdot \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \cdot K, \quad c = \frac{a}{\delta} > 1$			
	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 1,6 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 1,595 \text{ МПа}$ $K_R = 0,77$ $\frac{l}{\sqrt{R \cdot \delta}} \cdot \frac{\delta}{R} = 0,4$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 3,4 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 4,16 \text{ МПа}$ $K_R = 0,75$ $\frac{l}{\sqrt{R \cdot \delta}} \cdot \frac{\delta}{R} = 0,5$
5. Для шарнирно опертой цилиндрической панели при чистом сдвиге (по Кломп ) [3]	$\tau_{\text{кр}} = K_R \cdot E \cdot \left(\frac{\delta}{a}\right)^2, \quad 0 < \frac{a}{\delta} < 1; \quad K_R = 3,62 \sqrt{3,17 + 0,4 \text{ то;}} \quad \sqrt{\omega} = 0,58 \frac{a}{\sqrt{R \cdot \delta}}$			
	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 1,6 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 5,89 \text{ МПа}$ $K_R = 9,9; \sqrt{\omega} = 3,37$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = 3,4 \text{ МПа}$	$\tau_{\text{кр}}^{\text{теор}} = 13,2 \text{ МПа}$ $K_R = 10,74; \sqrt{\omega} = 3,67$

Рассмотрим особенности работы обшивок из фанеры в модели пролетного строения транспортной галереи в виде замкнутой цилиндрической оболочки (рисунок 1). Испытания модели выполнены в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко к.т.н. О.Г. Черных [1]. Выявлена местная потеря устойчивости в виде диагональных волн при сдвигающих напряжениях по контуру ячеек между ребрами, равных 1,6 МПа.

Это значение было принято за критическое. Конструкция, однако, продолжала воспринимать ступенчато возрастающую нагрузку до величины в 2,9 раза превышающей критическую. После снятия нагрузки волны, которые характеризуют местную потерю устойчивости, полностью исчезали.

Полученные результаты сравниваются с результатами испытаний авиационных конструкций. В таблице 1 приведены эмпирические формулы для определения критических на-

пряжений. Экспериментам на модели (1) и экспериментальным данным Ромашевского и Зотова [2] лучше соответствуют теоретические зависимости по Коттм, приведенные в книге Г. Хертеля [3]. Наши данные почти точно совпадают с теоретическими, предложенными Коттм, а также Секерж-Зеньковичем для анизотропных пластинок, используемым С.Г. Лехницким [4]. Распределение сдвигающих напряжений по контуру пластинки близко к равномерному (рисунок 2).

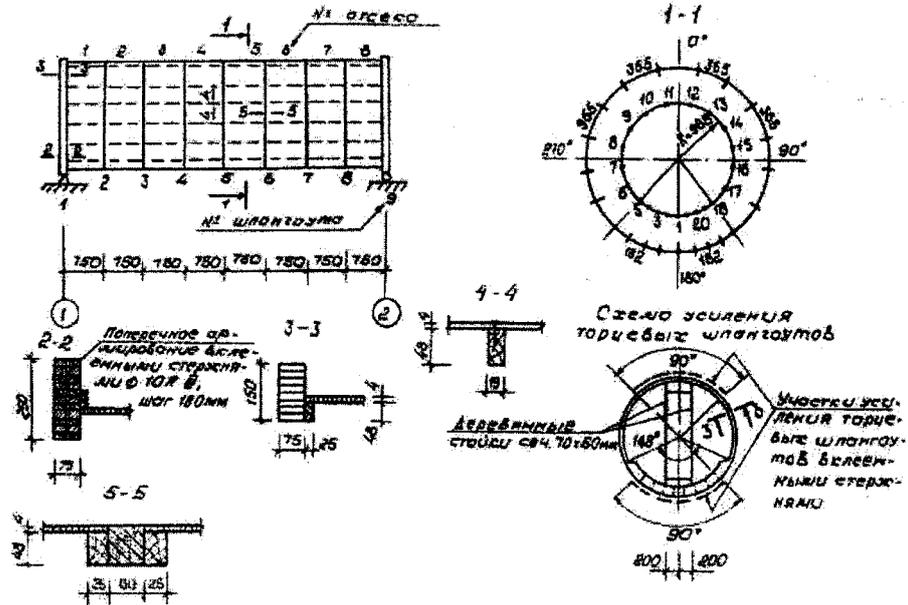


Рисунок 1 – Схематический чертеж экспериментальной модели оболочки

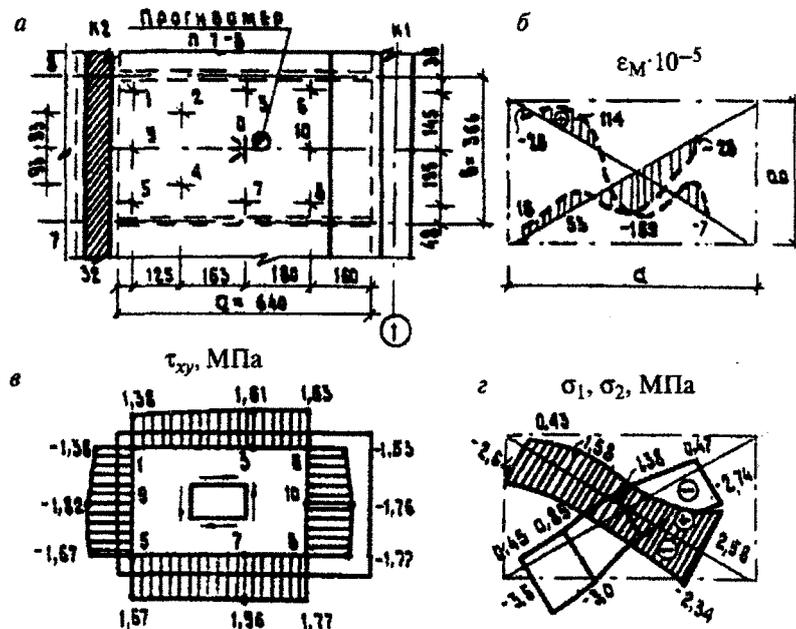


Рисунок 2 – Распределение относительных изгибных деформаций  $\epsilon_M$  (б), касательных напряжений  $\tau_{xy}$  (в), экстремальных нормальных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$  (г) в обшивке панели 7-8 в послекритическом состоянии

При испытаниях модели транспортной галереи проявилась еще одна особенность предельного состояния обшивок, заключающаяся в отрыве обшивок от ребер каркаса в местах образования складок на обшивке.

По эксперименту установлена картина местной потери устойчивости с образованием, как правило, трех полуволн: одна впадина и два гребня. Глубина впадины меняется от 0,07 мм до 10,88 мм в зависимости от нагрузки. Первая заметная на глаз волна появилась на 4 ступени нагружения при нагрузке  $P_{кр} = 77,6$  кН или  $0,35P_{разр}$ .

Для определения перекося ячеек надо анализировать деформации соседних шпангоутов, особенно торцевого и соседнего с ним рядового шпангоутов. Разница в жесткостях этих шпангоутов была четырехкратной и торцевой шпангоут деформировался с укорочением вертикального диаметра и с удлинением горизонтального до 7 мм при расчетной нагрузке, а деформации соседних рядовых шпангоутов – примерно на 30-40% меньше. Из-за этого перекося ячеек обшивки на основании геометрического анализа размеров волн на обшивке достигал 1,2 мм.

Исходя из экспериментально полученных размеров волн на обшивке напряжения отрыва обшивок от ребер с учетом средней прочности соединений сосна+клей КБ-3 при растяжении поперек волокон составляющей 0,35-0,5 МПа, [5] рекомендуется проверять по формуле:

$$\sigma_R = \frac{3EJ}{R^2bh}, \quad (1)$$

полученной из выражения для определения поперечных растягивающих усилий при изгибе криволинейных деревянных элементов [6]:

$$\sigma_R = \frac{3M}{2Rbh} \quad (2)$$

путем подстановки вместо  $M$  его значения  $M = \frac{EJ}{R}$ ,

где  $R$  – радиус кривизны зоны вмятины,  $bh$  – размеры сечения единичной полоски.

Размеры волн на обшивке перед разрушением: глубина вмятины  $f = 10$  мм и длина полуволны  $2a = 200$  мм. Значения величин, определенных из эксперимента, приняты следующими:

$$E = 9 \cdot 10^4 \text{ МПа}; R = 83,6 \text{ см}; J = \frac{bh^3}{12}; h = 0,4 \text{ см}.$$

После вычислений значение  $\sigma_R$  получилось равным 0,51 МПа, т.е. соответствует напряжению отрыва [5] обшивки от ребер.

Для обеспечения необходимой прочности обшивок на отрыв в рассмотренном случае следует ограничивать разницу в жесткостях торцевого и первого рядового шпангоутов не более 4.

Аналогичный анализ следует проводить в случаях оболочек другой геометрии.

### Выводы

Расчеты показали, что тонкие обшивки оболочек, объединяющие систему ребер в пространственную конструкцию, могут работать после наступления местной потери устойчивости. При этом критические напряжения сдвига могут быть превышены в 4-5 раз.

После образования волн на обшивке ее работа качественно изменяется. Появляются «диагональные поля растяжений», напряжения сжатия в направлении другой диагонали могут постепенно уменьшаться. В этих условиях разрушение обшивок может происходить по двум вариантам: 1 – разрыв обшивки поперек волокон наружных шпонов, 2 – отрыв обшивок от ребер в местах ее выпучивания, т.е. в направлении гребня волны.

В первом случае необходимо проверить превышение критерия прочности Г.А. Генеева на отрыв вдоль главных осей анизотропии [7].

$$\left[ \frac{R_{px}}{\Psi_{px}(t_d)} - \sigma_x \right] \left[ \frac{R_{py}}{\Psi_{py}(t_d)} - \sigma_y \right] = 0, \quad (3)$$

где  $R_{px}, R_{py}$  – пределы кратковременной прочности фанеры на растяжение.

$$\Psi_{px}(t_0) = 1 + \delta_x (1 - e^{-\omega_x t_0}) > 1; \quad (4)$$

$$\Psi_{py}(t_0) = 1 + \delta_y (1 - e^{-\omega_y t_0}) > 1;$$

$$\delta_x = \frac{E_{x0}}{E_{x1}}; \delta_y = \frac{E_{y0}}{E_{y1}}; \quad (5)$$

$$\omega_{x1} = \frac{E_{x1}}{K_{x1}}; \omega_{y1} = \frac{E_{y1}}{K_{y1}} \text{ (с}^{-1}\text{)}, \quad (6)$$

$E_{i1}$  – обобщенные модули упругости в модели Кельвина Фойгта;  $K_{i1}$  – обобщенные модули вязкого сопротивления.

Численные значения  $\delta_i$  и  $\omega_i$  определяются на основании экспериментальных данных.

Величины  $\psi_x$  и  $\psi_y$  уменьшают значения кратковременной прочности в представленном критерии длительной прочности анизотропного материала.

Во втором случае следует ограничивать размеры глубины волн на обшивке так, чтобы напряжения отрыва из плоскости фанеры не превышали величины 0,5 МПа, что происходит при глубине волн около 10 мм и длине полуволны около 200 мм. К этому моменту коэффициент превышения [3] может достигать величины 2,9-3,0 по отношению к критической нагрузке при напряжениях сдвига в обшивках, принимаемых  $\tau=1,6$  МПа.

Изложенное позволяет также сделать заключение о необходимости разработки эффективных клеев для использования в соединениях конструкций в построечных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятикрестовский, К.П. Исследования замкнутой цилиндрической оболочки из клееной древесины и фанеры [Текст] / К.П. Пятикрестовский, О.Г. Черных // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: [б.и.]. – 200 – №5. – С. 72-84.
2. Ромашевский, А.Ю. Экспериментальное исследование деревянных фюзеляжей [Текст] / А.Ю. Ромашевский, А.Ф. Зотов // Технические отчеты ЦАГИ, 1941. – №1. – С. 4-29.
3. Хертель, Г. Тонкостенные конструкции [Текст] / Г. Хертель. – М.: Машиностроение, 1965. – 526 с.
4. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластинки [Текст] / С.Г. Лехницкий. – М.: Гостехтеориздат, 1947. – 252 с.
5. Фрейдин, А.С. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины [Текст] / А.С. Фрейдин, К.Т. Вуба. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 223 с.
6. Справочное руководство по древесине [Текст] (перевод с английского Я.П. Горелика, Т.В. Михайловой) – М.: Лесная промышленность, 1979. – 544 с.
7. Гениев, Г.А. Вопросы длительной и динамической прочности анизотропных конструктивных материалов [Текст] / Г.А. Гениев, К.П. Пятикрестовский. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. – 32 с.

Пятикрестовский К.П.  
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва  
Кандидат технических наук  
Тел.: 8 925 060 91 06

УДК 624.074

ТУРКОВ А.В., САВИН С.Ю., БОЯРКИНА О.В.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ЗАДАЧ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА И СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛОК НЕЛИНЕЙНО ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТЫ

В статье рассматриваются во взаимосвязи задачи поперечного изгиба однопролетных балок нелинейно переменной толщины, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой, и их свободных колебаний в ненагруженном состоянии. Выведены приближенные аналитические зависимости для определения максимального прогиба и частоты собственных колебаний двухшарнирных балок, толщина которых меняется по параболическому закону. С использованием численных методов аналогичные зависимости построены для однопролетных балок с различными граничными условиями. Показано, что произведение максимального прогиба на квадрат основной частоты колебаний балки линейно связано с отношением высот опорного сечения и сечения в середине пролета.

**Ключевые слова:** упругие балки, поперечный изгиб, свободные колебания, максимальный прогиб, основная частота колебаний.

In article are considered in intercoupling the problem transverse bend onspan of the beams unlinear variable thickness, loaded evenly by portioned load, and their free fluctuations in not-loaded condition. Vvedeny drawn near analytical dependencies for determination greatly sagging and frequencies of the own fluctuations twohinge beams, which thickness is changed on parabolic law. With use the numerical methods to similar dependencies are built for onspan beams with different border condition. It is Shown that making the maximum sagging on square of the main frequency of the fluctuations of the beam is linear connected with attitude of the heights of the supporting section and sections in medium stairwell.

**Keywords:** elastic beams, transverse bend, free fluctuations, maximum sagging, basic oscillation frequency.

В ряде работ проф. В.И. Коробко, например, [1], для однопролетных балок постоянного сечения была установлена фундаментальная закономерность, согласно которой независимо от вида граничных условий балки произведение ее максимального прогиба  $w_0$  от действия равномерно распределенной нагрузки  $q$  на квадрат основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии  $\omega$  с точностью до размерного множителя  $q/m$  есть величина постоянная, равная  $4/\pi$ :

$$w_0 \omega^2 = \frac{4q}{\rho m}, \quad (1)$$

где  $m$  – погонная масса балки.

Эта закономерность позволяет в экспериментальной механике и при испытании конструкций контролировать жесткость балок по их основной (или первой резонансной) частоте колебаний. На ее основе разработаны десятки способов диагностики и контроля качества строительных конструкций балочного типа [2].

В настоящей статье исследуется поведение произведения  $w_0 \omega^2$  для однопролетных балок нелинейно-переменной высоты в зависимости от отношения высот опорного сечения  $h_{\text{оп}}$  и сечения в середине пролета  $h_0$ .

Рассмотрим балку, изображенную на рисунке 1, а.

Ширина поперечного сечения балки  $b$  постоянна. Зададим закон изменения высоты поперечного сечения функцией:

$$h = h_{\text{оп}} + 2k\sqrt{1 - |x|}. \quad (2)$$

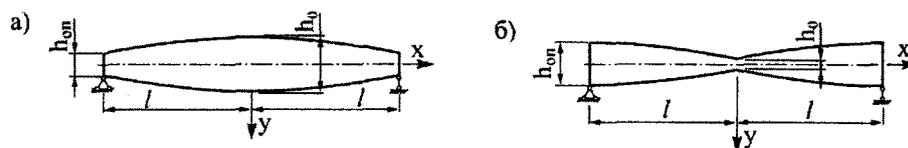


Рисунок 1 – Балки нелинейно-переменного сечения с высотой, изменяющейся по квадратной параболе: а – балка 1, б – балка 2

При этом законе момент инерции сечения будет определяться по формуле:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b}{12} \left[ h_{\text{оп}} + \left( 2k(l^2 - x^2) \right) \right]^3, \quad (3)$$

а погонная масса – по формуле:

$$m = \frac{b \cdot h \cdot l \cdot c}{l \cdot g} = \frac{b \cdot h \cdot c}{g} = \frac{b \cdot c}{g} \cdot \left( h_{\text{оп}} + 2k(l^2 - x^2) \right), \quad (4)$$

где  $\rho$  – объемный вес материала балки.

При определении максимального прогиба балки начало системы координат перенесем на левую опору (рисунок 2) и используем интеграл Максвелла-Мора, для чего построим эпюры изгибающих моментов грузового (рисунок 2, б) и единичного (рисунок 2, в) состояний.

В принятой системе координат эти моменты выражаются зависимостями:

$$M_p = qlx - q \frac{x^2}{2}; \quad \bar{M}_1 = \frac{x}{2}.$$

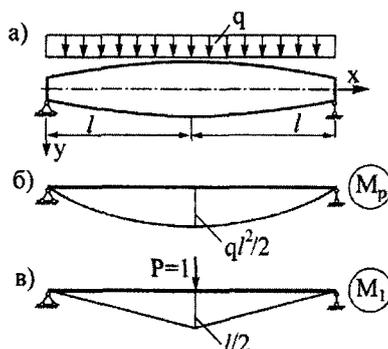


Рисунок 2 – К определению максимальных прогибов балки 1

Проведем аналогичные выкладки для балки, изображенной на рисунке 1, б. Ширина поперечного сечения балки  $b$  также постоянна. Зададим закон изменения высоты поперечного сечения функцией:

$$h = h_{\text{оп}} + 2k\sqrt{|x|}. \quad (5)$$

При этом законе момент инерции сечения будет определяться по формуле:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b}{12} \left[ h_{\text{оп}} + 2kx^{1/2} \right]^3, \quad (6)$$

а погонная масса – по формуле:

$$m = \frac{b \cdot h \cdot l \cdot \rho}{l \cdot g} = \frac{b \cdot h \cdot \rho}{g} = \frac{b \cdot \rho}{g} \left( h_{\text{оп}} + 2k \cdot x^{1/2} \right) \quad (7)$$

При определении максимального прогиба балки начало системы координат также перенесем на левую опору аналогично рисунку 2, а и используем интеграл Максвелла-Мора, для чего построим аналогичные эпюры изгибающих моментов и единичного состояния.

В принятой системе координат эти моменты также выражаются зависимостями:

$$M_p = q\ell x - q \frac{x^2}{2}; \quad \bar{M}_1 = \frac{x}{2}. \quad (8)$$

### Балки нелинейно-переменной жесткости с различными граничными условиями

Получить аналитическое решение для вышеприведенных балок весьма сложно. Поэтому были проведены численные исследования с помощью МКЭ (по программе «SCAD») балок с различными граничными условиями на концах: 2 шарнира, 1 шарнир и 1 заделка, 2 заделки.

В качестве расчетной принята деревянная балка пролетом 3 м. Сечение исходной балки постоянного сечения  $b \times h = 40 \times 100$  мм. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $1 \text{ кН/м}$ , модуль упругости  $E = 10^4 \text{ МПа}$ . При исследованиях варьировалась высота сечения на опоре и в середине пролета с шагом 10 мм, причем коэффициент  $k$  в формулах (2) и (5) принимался таким образом, что среднее значение высоты сечения всегда было постоянным и равным высоте сечения исходной балки, т.е.  $h_{cp} = (h_{on} + h_0) / 2 = 100 \text{ мм} = const$ .

Балка разбивалась на 20 конечных элементов, жесткость каждого элемента принималась средней по его длине. Сосредоточенные массы от собственного веса балки прикладывались в узлы элементов, а их интенсивность принималась в зависимости от высоты сечения конкретного конечного элемента. При определении коэффициента  $K$  погонная масса принималась как среднее значение между  $m_0$  и  $m_{on}$ . Результаты численных исследований приведены в таблице 1.

По результатам исследований построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения  $h_{on}/h_0$  (рисунок 3 и 4).

**Балка 1.** Анализ приведенных графиков (рисунок 3) показывает, что в двухшарнирной балке прогибы монотонно снижаются, а частоты собственных колебаний увеличиваются с уменьшением соотношения  $h_{on}/h_0$ .

В балке с комбинированными условиями опирания наряду с монотонным снижением прогибов частоты колебаний имеют максимум при соотношении  $h_{on}/h_0 \approx 0,43$ .

В балке с жесткими заделками на опорах при монотонном снижении частот собственных колебаний прогибы имеют минимум при соотношении  $h_{on}/h_0 = 0,54$ . Следует также отметить, что прогибы балки с заделками на опорах изменяются весьма незначительно (в пределах всего 10%) в зависимости от соотношения  $h_{on}/h_0$ . При этом коэффициент  $K$  практически не зависит от условий опирания балок и монотонно снижается при увеличении высоты сечения в середине пролета. Следует обратить внимание на отношение коэффициентов  $K$  для балки 1 при двух крайних значениях параметра  $h_{on}/h_0 = 1$  и  $h_{on}/h_0 = 0$ ; это отношение для различных граничных условий балки одинаковое и равно золотой пропорции 1,618.

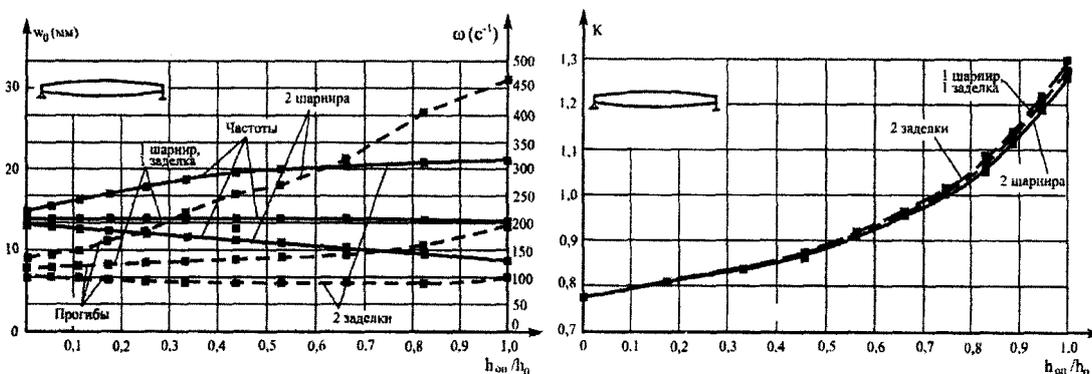


Рисунок 3 – Изменение максимальных прогибов, основной частоты колебаний и коэффициента  $K$  балки 1 нелинейно-переменной высоты

Таблица 1 – Результаты численных исследований деревянной балки нелинейно-переменной толщины

Схема опирания	$\frac{h_{оп}}{h_0}$	Балка 1			Балка 2		
		Основная частота колебаний $\omega$ (с <sup>-1</sup> )	Максимальный прогиб $w_0$ (мм)	$K = \frac{w_0 \cdot \omega^2}{(q/\bar{m})}$	Основная частота колебаний $\omega$ (с <sup>-1</sup> )	Максимальный прогиб $w_0$ (мм)	$K = \frac{w_0 \cdot \omega^2}{(q/\bar{m})}$
2 шарнира	1,0	140,2119	31,64063	1,268	140,21	31,641	1,268
	0,818	149,5633	26,11021	1,191	138,77	32,315	1,269
	0,667	158,3669	21,95620	1,223	135,18	34,088	1,270
	0,538	166,6610	18,76390	1,063	131,47	36,258	1,278
	0,429	174,3951	16,27312	1,009	125,34	40,169	1,286
	0,333	181,6397	14,28856	0,961	117,30	46,292	1,299
	0,250	188,2600	12,70489	0,918	107,12	56,171	1,314
	0,176	194,4273	11,40922	0,879	94,49	73,196	1,332
	0,111	199,2123	10,42984	0,844	79,249	105,64	1,353
	0,053	202,9553	9,686072	0,813	61,653	177,189	1,373
0,0	203,2280	9,324547	0,785	42,456	378,273	1,390	
1 шарнир, 1 заделка	1,0	219,0534	13,02097	1,285	219,05	13,021	1,285
	0,818	222,1207	12,00000	1,207	227,15	12,220	1,285
	0,667	224,3774	11,07110	1,136	233,34	11,563	1,283
	0,538	225,8934	10,31964	1,074	240,72	10,912	1,289
	0,429	226,5929	9,719520	1,017	246,21	10,490	1,296
	0,333	226,5540	9,239666	0,967	250,88	10,179	1,306
	0,250	225,7946	8,866219	0,922	254,78	9,9716	1,320
	0,176	224,5970	8,568127	0,881	258,06	9,868	1,340
	0,111	222,5496	8,361002	0,844	260,92	9,812	1,362
	0,053	220,4205	8,195007	0,812	263,69	9,775	1,386
0,0	217,1668	8,150074	0,783	265,25	9,738	1,411	
2 заделки	1,0	317,8674	6,328125	1,304	317,87	6,328	1,304
	0,818	311,8075	6,121383	1,213	336,41	5,713	1,318
	0,667	304,8863	5,994907	1,136	354,17	5,228	1,337
	0,538	297,1764	5,939190	1,069	371,39	4,838	1,360
	0,429	288,5762	5,955038	1,011	387,86	4,527	1,389
	0,333	279,1452	6,041138	0,960	403,74	4,282	1,423
	0,250	269,1371	6,191284	0,914	419,22	4,085	1,464
	0,176	258,9404	6,393627	0,874	434,63	3,924	1,511
	0,111	248,8421	6,635131	0,838	450,62	3,779	1,564
	0,053	240,1167	6,853351	0,806	468,68	3,624	1,623
0,0	233,0232	7,016883	0,777	490,04	3,438	1,683	

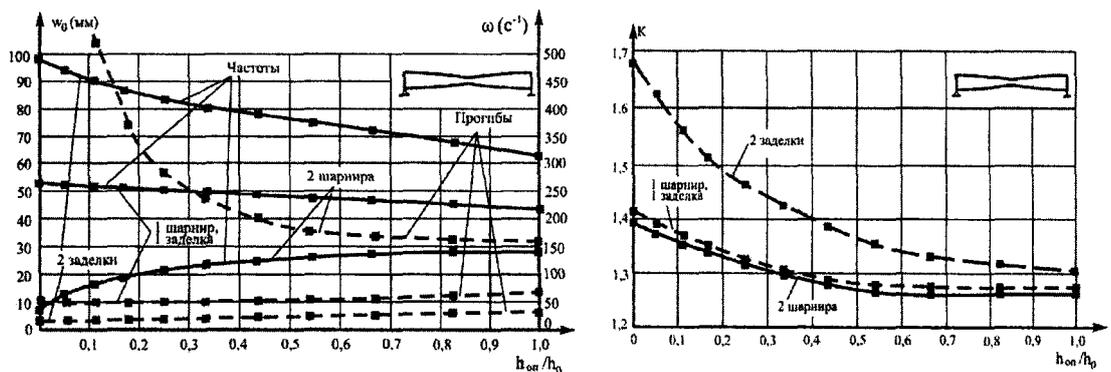


Рисунок 4 – Изменение максимальных прогибов, основной частоты колебаний и коэффициента  $K$  балки 2 нелинейно-переменной высоты

**Балка 2.** Анализ приведенных графиков показывает, что в двухшарнирной балке прогибы монотонно увеличиваются, а частоты собственных колебаний снижаются с уменьшением соотношения  $h_{оп}/h_0$ .

В балках с комбинированными условиями опирания и с двумя заделками на опорах наоборот, с монотонным снижением прогибов частоты колебаний монотонно возрастают при уменьшении соотношения  $h_{оп}/h_0$ .

Коэффициент  $K$  возрастает с уменьшением соотношения  $h_{оп}/h_0$ , при этом имеет близкие значения для двухшарнирной балки и балки с комбинированными граничными условиями и более интенсивно возрастает в балке с двумя заделками на опорах.

Полученные в статье результаты показывают, что с помощью выведенных зависимостей, а также используя кривые, полученные численными методами, можно решать задачу определения частот колебаний балок переменной жесткости по найденным (или определенным опытным путем) максимальным прогибам. Вместе с тем, возможно решение обратной задачи, когда по известным частотам колебаний определяется прогиб балки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробко, В.И. Некоторые закономерности колебаний однопролетных балок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №3. – С. 41-44.
2. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: АСВ, 2003. – 288 с.
3. Коробко, В.И. Строительная механика: Динамика и устойчивость стержневых систем [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: АСВ, 2008. – 400 с.

**Турков А.В.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-95  
E-mail: antur@orel.ru

**Савин С.Ю.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Инженер центра экспертизы промышленной безопасности  
Тел.: +7 (4862) 73-43-95

**Бояркина О.В.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Инженер центра экспертизы промышленной безопасности  
Тел.: +7 (4862) 73-43-95

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРЫ В СЖАТЫХ СЛОИСТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЯХ

*Приводятся результаты опытного и теоретического исследования сопротивления сжатию слоистых железобетонных стержней с высокопрочной арматурой при кратковременном воздействии силы, приложенной с эксцентриситетом в пределах упругого ядра сечения.*

**Ключевые слова:** арматура, бетон, напряженно-деформированное состояние, деформация, исследование, сопротивление, стержень, сжатие, железобетон, нагрузка, напряжение, ползучесть, прочность.

*The results of experimental and theoretical studies are discussed related to resistance to the compression of laminated ferroconcrete bars with high-tensile reinforcement under the short-term impact of the force applied with eccentricity within the a resilient core of section.*

**Keywords:** Reinforcement, concrete, mode of deformation, deformation, research, resistance, rod, compression, reinforced concrete, load, stress, creep, strength.

В современном строительстве все шире используются сборно-монолитные конструкции, которые можно рассматривать как составные (слоистые) железобетонные элементы, состоящие из бетонов с различными деформативными и прочностными характеристиками. При реконструкции зданий и сооружений, а именно в случае усиления железобетонных конструкций, например колонн или стен также необходимо учитывать совместную работу составных элементов из старого и нового бетонов. При этом приобретает большое значение проблема повышения эффективности усиления за счет использования высокопрочных материалов, и в том числе арматуры. Однако вопрос об использовании высокопрочной арматуры в составных (слоистых) сжатых стержнях средней гибкости с обычным поперечным армированием остается открытым, так как СНиП 52-01-2003 ограничивает величину предельного сопротивления сжатию значениями 400 МПа при кратковременном нагружении и 500 МПа – при длительном. Эти ограничения делают нерациональным использование высокопрочной стали в сжатых стержнях указанной гибкости. Предусмотренная более ранней редакцией СНиП возможность применения арматуры класса А600 и выше касается только стержней малой гибкости с косвенным или спиральным армированием.

Для изучения особенностей взаимодействия элементов составных железобетонных стержней, содержащих высокопрочную продольную арматуру класса Ат-V (А800) и бетоны с различными деформативными и прочностными характеристиками, были изготовлены шесть образцов колонн. Каждая из колонн состояла из двух ветвей, соединенных по всей длине хомутами. Колонны имели суммарное поперечное сечение прямоугольной формы размером 100x120 мм. Ветви образцов серии К-I соединялись вдоль стороны шириной 100 мм. Образцы серии К-II соединялись вдоль стороны шириной 120 мм (рисунки 1, 2). Шаг стальных хомутов из проволоки диаметром 4 мм класса Вр-I был постоянным и равным 100 мм. Продольная арматура каждой из ветвей содержала два арматурных стержня диаметром 12 мм класса А800.

С целью определения прочностных и деформативных характеристик бетонов опытных образцов для каждого состава бетона были изготовлены контрольные кубы и призмы. Бетонирование ветвей производилось с разрывом во времени, равным 135 суткам. По прошествии 7 суток после соединения ветвей из «сборного», т.е. ранее уложенного (ветвь 1) и «монолитного» (ветвь 2) бетонов, проводились кратковременные испытания до разрушения.

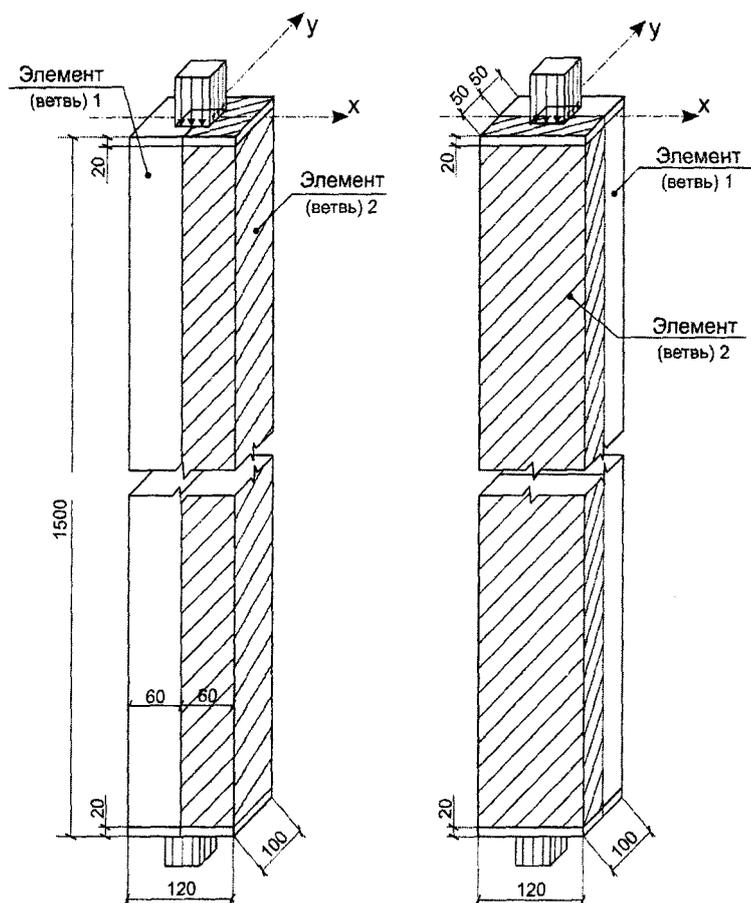


Рисунок 1 – Особенности компоновки составных сечений опытных колонн серии К-I и К-II и схемы испытаний их на центральное сжатие

Проведенными экспериментальными исследованиями [1] установлено, что введение в состав сечений продольной арматуры из высокопрочной стали существенно меняет сложившиеся представления об уровне напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, испытывающих сжатие близкое к однородному, или характеризующееся значениями эксцентриситетов, не выходящих за пределы упругого ядра сечения. Высокопрочная арматура, являясь мощной упругой связью, при развитии неупругих деформаций бетона, сопровождающихся даже при кратковременном нагружении интенсивным развитием ползучести бетона, вызывает перераспределение внутренних усилий между “старым” и вновь уложенным бетоном, а также самой арматурой. При этом высокопрочная арматура догружается, а в монолитном бетоне могут возникнуть на наименее сжатых гранях даже растягивающие напряжения.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния слоистых стержней в процессе эксплуатации разработана методика расчета, учитывающая развитие в бетоне быстронатекающих деформаций ползучести. Данный расчетный аппарат отражает все особенности изменения напряженно-деформированного состояния в рассматриваемых конструкциях [2], достоверность которых подтверждается результатами опытного исследования. Разработанная методика расчета основана на представлении об определении текущих (полных) значений параметров напряженно-деформированного состояния как суммы начальных (условно упругих) и дополнительных, развивающихся при неупругом деформировании бетона в условиях кратковременной ползучести.

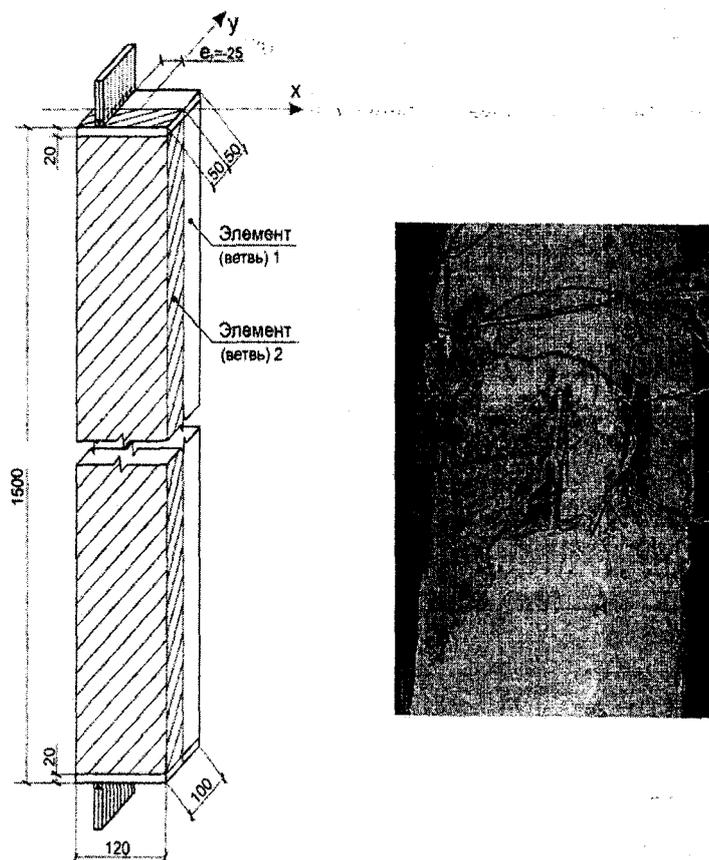


Рисунок 2 – Схема испытаний опытных колонн серии К- II на внецентренное сжатие и фотография разрушения колонны

Первые величины определяются по формулам сложного сопротивления упругих тел. Вторые, т.е. дополнительные значения напряжений, деформаций и перемещений вычисляются на основе предложенной в работе [3] алгебраической зависимости между напряжениями и деформациями в бетоне при ползучести. Эта методика предусматривает составление условий равновесия дополнительных усилий, развивающихся в арматуре и бетоне, и уравнений совместности дополнительных деформаций на уровне их контактов. Использована также предположка о представлении изгиба продольной оси по закону синусоиды.

В таблицах 1 и 2 приведены опытные и теоретические значения основных параметров испытанных образцов.

Индексами «1» и «2» обозначены напряжения в арматуре, находящейся соответственно в первой (1) и второй (2) ветвях слоистого стержня;  $N_u$  – разрушающее усилие.

За опытные напряжения в арматуре приняты вычисленные по диаграмме « $\sigma_s - \epsilon_s$ » напряжения с использованием опытных величин деформаций. Диаграмма « $\sigma_s - \epsilon_s$ » построена по результатам испытаний арматурных стержней из стали класса А 800. Опытные в таблицах не указаны, но по отношению к ним вычислены отклонения расчетных величин. Во всех случаях вычисления выполнялись с учетом неупругого состояния бетона, то есть с использованием понятия модуля деформации вместо начального значения модуля упругости.

Данные таблицы 1 и 2 показывают, что напряжения в арматуре, вычисленные по предлагаемой методике с учетом ползучести бетона [2], значительно превосходят начальные, вычисленные без учета ползучести. Достоверность вычисленных с учетом деформаций ползучести напряжений в арматуре подтверждается удовлетворительным их соответствием

опытным величинам. Расхождение между вычисленными в этом случае напряжениями и опытными их значениями не превышает, как правило, 5%...10%. В то же время расхождение опытных величин с напряжениями, вычисленными без учета ползучести, находятся в пределах не меньших 25...30%, достигая иногда 40%.

Таблица 1 – Сравнение вычисленных по разработанной методике  $\sigma'_{Si}$  (МПа) и опытных  $\sigma'_{Sb\text{оп}}$  (МПа) напряжений в наиболее сжатой арматуре при различных значениях  $N/N_u$

Шифр образца	Усилие $N$ , кН	$N/N_u$	$e_0/h$	Вычисленные напряжения без учета ползучести				Вычисленные напряжения с учетом ползучести			
				$\sigma'_{S1}$	$\sigma'_{S1}/\sigma'_{S1\text{оп}}$	$\sigma'_{S2}$	$\sigma'_{S2}/\sigma'_{S2\text{оп}}$	$\sigma'_{S1}$	$\sigma'_{S1}/\sigma'_{S1\text{оп}}$	$\sigma'_{S2}$	$\sigma'_{S2}/\sigma'_{S2\text{оп}}$
К-I-1 К-I-2	277	0,74	0	284,1	0,82	281,8	0,76	341,53	0,99	401,31	1,08
К-I-1 К-I-2	186	0,50	0	190,8	0,78	189,2	0,71	225,84	0,93	265,75	0,99
К-II-1 К-II-2	283	0,81	0	–	–	290,2	0,75	–	–	430,49	1,11
К-II-1 К-II-2	175	0,50	0	–	–	177,3	0,72	–	–	256,93	1,04
К-II-7 К-II-8	184,5	0,76	0,21	310,0	0,81	301,0	0,65	367,62	0,95	420,26	0,91
К-II-7 К-II-8	125	0,51	0,21	210,3	0,62	203,9	0,73	261,1	0,77	301,76	1,08

Таблица 2 – Вычисленные по разработанной методике напряжения в бетоне (МПа) при различных значениях уровня сжатия образцов  $N/N_u$

Шифр образца	Усилие $N$ , кН	$N/N_u$	$e_0/h$	Без учета ползучести				С учетом ползучести			
				на более сжатых гранях	на более сжатых гранях	на менее сжатых гранях	на менее сжатых гранях	на более сжатых гранях	на более сжатых гранях	на менее сжатых гранях	на менее сжатых гранях
				$\sigma'_{в1}$	$\sigma'_{в2}$	$\sigma_{в1}$	$\sigma_{в2}$	$\sigma'_{в1\text{г}}$	$\sigma'_{в2\text{г}}$	$\sigma_{в1\text{г}}$	$\sigma_{в2\text{г}}$
К-I-1 К-I-2	277	0,74	0	19,12	16,8	11,19	9,94	16,95	11,9	9,81	7,2
К-I-1 К-I-2	186	0,50	0	12,69	11,15	7,67	6,8	11,2	7,88	6,8	4,97
К-II-1 К-II-2	283	0,81	0	15,56	17,28	11,53	13,73	14,93	13,08	8,96	9,14
К-II-1 К-II-2	175	0,50	0	9,62	10,54	7,29	8,49	9,22	7,76	5,97	5,64
К-II-7 К-II-8	184,5	0,76	0,21	22,2	19,3	-1,96	-1,5	19,28	13,12	-1,45	-0,4
К-II-7 К-II-8	125	0,51	0,21	15,62	13,62	-1,30	-0,99	13,67	9,42	-0,93	-0,19

1. Индексами «1» и «2» обозначены напряжения в бетоне соответственно в первой (1) и второй (2) ветвях.
2. Отрицательным значениям напряжений соответствует растяжение.

Не менее интересным представляется сопоставление значений вычисленных напряжений в бетоне с учетом и без учета ползучести бетона. По приведенным в таблице 2 данным, напряжения в бетоне, определенные по разработанной методике в предположении отсутствия ползучести во многих случаях, а на наиболее сжатых гранях внецентренносжатых колонн всегда превышают опытные почти в два раза значения прочности бетона на сжатие, определенные при испытаниях кубов и призм. Те же напряжения, вычисленные с учетом ползучести по предлагаемой методике, обычно не превышают предельных опытных значений. Другими словами, выполненный по предлагаемой методике [2] расчет подтвердил факт значительного перераспределения внутренних усилий, происходящий уже в процессе нагружения образцов колонн, не превышающий 2-3 часов. Это перераспределение сопровождается значительной догрузкой арматуры и заметным разгрузением бетонов. Потребовалась дополнительная пригрузка образцов на 20-50%, чтобы вызвать их разрушение.

Таким образом, можно сделать вывод о высокой эффективности использования высокопрочной арматуры в сжатых стержнях достаточно большой гибкости и надежности предлагаемой расчетной методики определения параметров напряженно-деформированного состояния, учитывающей развитие в бетоне быстроснабегающих деформаций ползучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Узунова, Л.В. Кратковременное и длительное сопротивление сжатию составных железобетонных стержней [Текст] / Л.В. Узунова, А.В. Федоров, В.Ф. Захаров // Известия КГТУ. – Калининград: КГТУ. – 2005. – №7. – С. 130-134.
2. Узунова, Л.В. Методика расчета напряженно-деформированного состояния составных стержней с высокопрочной арматурой [Текст] / Л.В. Узунова // Вестник БГТУ, 2009 – №1. – С. 154-156.
3. Захаров, В.Ф. О замене интегральных уравнений теории ползучести бетона алгебраическими [Текст] / В.Ф. Захаров, А.Б. Голышев // Строительные конструкции: сборник. – Киев: Будивельник, 1969 – вып. XII. – С. 71-80.

Узунова Л.В.

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград

Доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»

Тел.: +7 (4012) 53-44-97

E-mail:PGS.KGTU@rambler.ru

УШАКОВ С.И.

## ДЕФОРМАЦИИ И МИКРОТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРБЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

*Приведены результаты исследований процессов образования и роста микротрещин в эпоксидном полимербетоне при сжатии на основе анализа деформационных кривых и дефекта плотности в комплексе с акустико-эмиссионными особенностями разрушения полимербетона. Дана оценка абсолютных размеров микротрещин, образующихся в эпоксидном полимербетоне под нагрузкой.*

**Ключевые слова:** трещины, полимербетон, коррозия, ультразвук, деформации, дефект плотности.

*The results of investigations of the formation and growth of microcracks in the epoxy polymer concrete under compression based on the analysis of deformation curves and the defect density in the complexes with the acoustic emission characteristics of the destruction of polymer concrete. The estimation of the absolute size of microcracks formed in the epoxy polymer concrete under load.*

**Keywords:** cracks, polymer concrete, corrosion, ultrasound, deformation, defect density.

Коррозионная стойкость эпоксидного полимербетона является одним из определяющих его свойств, которая сочетается с высокими конструкционными качествами [1]. Разрушение полимербетонных конструкций представляет собой сложный, довольно протяженный во времени процесс, сопровождающийся образованием большого числа микротрещин в структуре (более  $600 \text{ см}^3$ ) [2]. По данным ВНИИГ им. Веденеева [3] защитные свойства бетона по отношению к арматуре снижаются при образовании структурных микротрещин в материале. Допуская, что все увеличение объема бетона при растяжении происходит только за счет образования и подрастания микротрещин, авторы получили выражение, связывающее среднюю скорость коррозии с относительным удлинением бетона. При сжатии зависимость получается более сложной в силу непостоянства коэффициента поперечного расширения бетона, который зависит от сжимающих напряжений. Экспериментально процесс развития трещин в цементном бетоне исследовался при одноосном сжатии и воздействии агрессивной среды. Показано, что с развитием процесса микротрещинообразования в сжатых бетонах коррозионные процессы ускоряются. Основной областью применения эпоксидного полимербетона являются несущие конструкции, эксплуатируемые в сильно агрессивных средах. Защитный слой эпоксидного полимербетона, в отличие от цементного бетона, не обладает пассивирующими свойствами по отношению к арматуре и предотвращает коррозию арматуры за счет трещиностойкости и замкнутости пор. Наличие коррозионно-активных эксплуатационных сред предъявляет жесткие требования к трещиностойкости эпоксидных полимербетонных конструкций, а связанные с этим вопросы исключительно важны. Следовательно, долговечность конструкции определяется не только видом эксплуатационной среды, но и уровнем микротрещинообразования в структуре бетона. Согласно теории, предложенной О.Я. Бергом [4], при нагружении в бетоне накапливаются множество микроразрушений, которые при дальнейшем росте нагрузки переходят в макротрещины. Эти явления О.Я. Берг предложил характеризовать обобщенными параметрическими точками, определяющими нижнюю границу микроразрушений и верхнюю условную границу микротрещин. За первую параметрическую точку О.Я. Берг принял начало разрушения и разрыхления структуры бетона при последующем росте напряжений. За вторую параметрическую точку Берг принимает напряжение, соответствующее приращению дифференциального коэффициента поперечных деформаций, равное

0,5, от которого при дальнейшем росте нагрузки разуплотнение начинает превалировать над процессами уплотнения бетона [4].

Следует заметить, что физический смысл структурно-механических характеристик в разных работах толкуется по-разному и все еще остается недостаточно ясным.

Основной областью применения эпоксидного полимербетона являются несущие конструкции, эксплуатируемые в сильно агрессивных средах, однако защитный слой эпоксидного полимербетона, в отличие от цементного бетона, не обладает пассивирующими свойствами по отношению к арматуре и предотвращает коррозию арматуры за счет трещиностойкости и отсутствия сквозных пор. Указанные специфические свойства и область применения эпоксидных полимербетонов предъявляют жесткие требования к трещиностойкости, а связанные с этим вопросы становятся доминирующими.

Нами были исследованы как эпоксидные полимербетонные элементы при осевом сжатии, так и цементобетонные элементы. На рисунке 1 приведен вид экспериментальных кривых продольных и поперечных деформаций, полученных по результатам испытания 15 образцов из эпоксидного полимербетона, а на рисунке 2 приведены их относительные объемные деформации при сжатии.

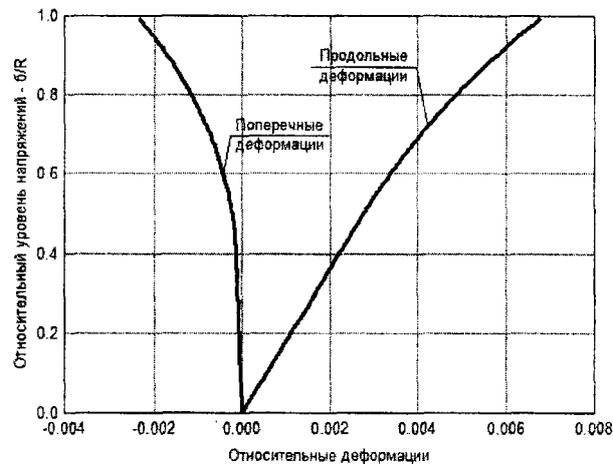


Рисунок 1 – График изменение относительных продольных и поперечных деформаций в эпоксидном полимербетоне при сжатии

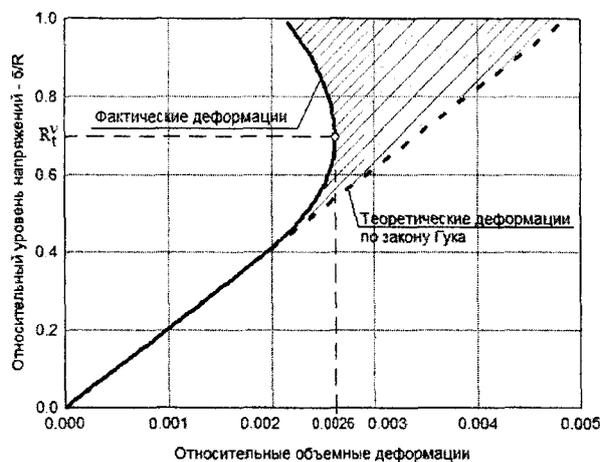


Рисунок 2 – График изменение относительных объемных деформаций фактических и теоретических по закону Гука в эпоксидном полимербетоне при сжатии

Для оценки параметрических точек вычислялись относительная объемная деформация и дифференциальный коэффициент поперечных деформаций [4]. Относительные объемные деформации вычислялись по формуле (1):

$$Q = \varepsilon_z + \varepsilon_x + \varepsilon_y, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_z$  – средняя относительная продольная деформация,  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – средние относительные поперечные деформации.

Как видно из рисунка 2, экстремум функции соответствует уровню нагрузки  $0,71 \times (\sigma/R)$  и согласно [4] является второй параметрической точкой.

Аналогичный результат был получен путем построения зависимости дифференциального коэффициента поперечных деформаций от нагрузки [4]. Значение коэффициента вычислялось по формуле:

$$kV = \frac{\Delta \varepsilon_z}{\Delta \varepsilon_x + \Delta \varepsilon_y}. \quad (2)$$

О.Я. Берг принимал напряжение, соответствующее приращению дифференциального коэффициента поперечных деформаций, равное 0,5, от которого при дальнейшем росте нагрузки разуплотнение начинает превалировать над процессами уплотнения [4]. Как видно из графика на рисунке 3, изменения дифференциального коэффициента поперечных деформаций и уровень  $R_t^y/R_b = 0,73$  совпадают с полученными из приведенного анализа объемных деформаций.

Для цементных бетонов уровень начала интенсивного трещинообразования [3] определяется по формуле:

$$R_t^y / R_b = 0,35 \times \lg(R_b) - 0,175. \quad (3)$$

В этом случае уровень  $R_t^y/R_b$  должен быть равен 0,83. Однако экспериментальные данные не подтверждают применимость приведенной зависимости для эпоксидного бетона. Экспериментально установленный уровень  $R_t^y/R_b$  для эпоксидного полимербетона несколько ниже, чем для цементного бетона, и составил величину 0,73 от разрушающей нагрузки.

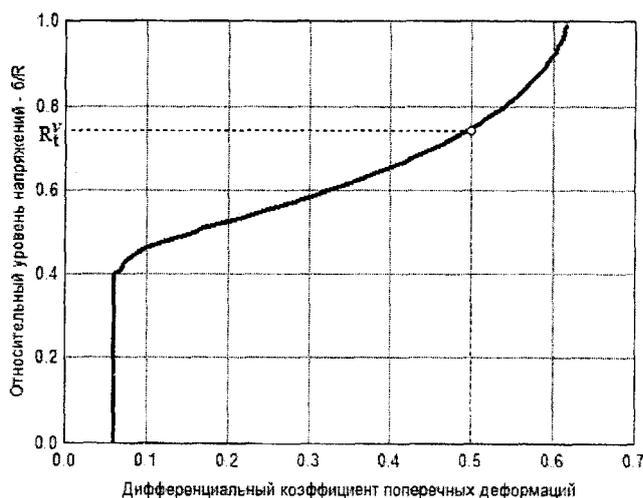


Рисунок 3 – Изменение дифференциального коэффициента поперечных деформаций в эпоксидном полимербетоне при сжатии

Верхняя параметрическая точка, соответствующая началу интенсивного трещинообразования  $R_m^y/R_b$  (по О.Я. Бергу) для эпоксидного полимербетона, составляет величину 0,73.

Что касается исследования количества образующихся микротрещин в структуре полимербетона, то нами были поставлены специальные эксперименты по регистрации количества микротрещин, выполненные методом акустической эмиссии (АЭ) по методике [2].

По результатам испытания 15 полимербетонных призм напряжение разрушения при сжатии кратковременной нагрузкой составило величину  $R=75$  МПа. Полное разрушение наступало при достижении скоростью акустической эмиссии величины в среднем  $400 \text{ сек}^{-1}$ , такая скорость эмиссии достигалась при нагружении образца в течение 10 мин. С ростом уровня нагружения при постоянном его темпе отмечен рост скорости излучения сигналов трещинообразования. На рисунке 4 приведен вид кривой скорости излучения сигналов акустической эмиссии.

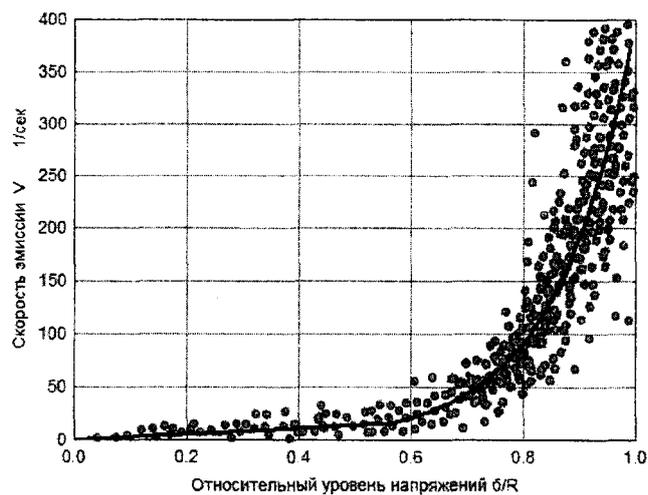


Рисунок 4 – График зависимости скорости акустической эмиссии от нагрузки при кратковременных испытаниях:  $V$  – скорость акустической эмиссии;  $t$  – время нагружения

Анализ зависимости скорости акустической эмиссии как функции от времени нагружения при скорости нагружения  $0,12 \text{ МПа/сек}$ , показал, что она может быть аппроксимирована с коэффициентом корреляции  $r_1 = 0,874$ ,  $r_2 = 0,892$  двумя зависимостями вида:

$$\text{– при } \sigma / R \leq 0,56, V = 28.200 \times \left(\frac{\sigma}{R}\right); \quad (4)$$

$$\text{– при } \sigma / R > 0,56, V = 0,25 \times e^{7,38 \times (\sigma/R)}. \quad (5)$$

Суммарное количество сигналов АЭ от начала нагружения до заданного уровня напряжений получаем путем интегрирования выражений (4, 5) с учетом фактора времени до полного разрушения образца  $t=600 \text{ сек}$ . и постоянной скорости нагружения:

$$\text{– при } \sigma / R \leq 0,56, N_{\Sigma} = \int 600 \times 28.200 \times \left(\frac{\sigma}{R}\right) = 8460 \times (\sigma / R)^2; \quad (6)$$

$$\text{– при } \sigma / R > 0,56, N_{\Sigma} = \int 600 \times 0,25 \times e^{7,38 \times (\sigma/R)} = 20,325 \times e^{7,38 \times (\sigma/R)}. \quad (7)$$

Изменение суммарного относительного объема микротрещин в эпоксидном полимербетоне оценивается разностью экспериментальных значений изменений относительного объема и теоретических значений (рисунок 4), вычисленных по закону Гука из предположения абсолютной упругости материала:

$$\Delta V_{\theta} = (\theta_L - \theta_{crc}) \cdot V_m, \quad (8)$$

где  $V_m$  – объем образца.

В результате образовавшийся дефект плотности объясняется в основном за счет образования микротрещин в структуре бетона. Графически выражение (8) представлено на рисунке 5.

Объем одной усредненной микротрещины при постоянно растущих сжимающих напряжениях определялся как отношение суммарного объема всех микротрещин (8) к их количеству, зарегистрированному методом АЭ (6, 7):

$$\Delta V_{crc} = \frac{\Delta V_{\theta}}{N_{\Sigma}}. \quad (9)$$

Выражение (9) справедливо для эпоксидного полимербетона при нагрузке  $(\sigma/R) \geq 0,56$ . При этом подрастание существующих микротрещин и образование новых микротрещин считалось одним процессом образования микротрещин.

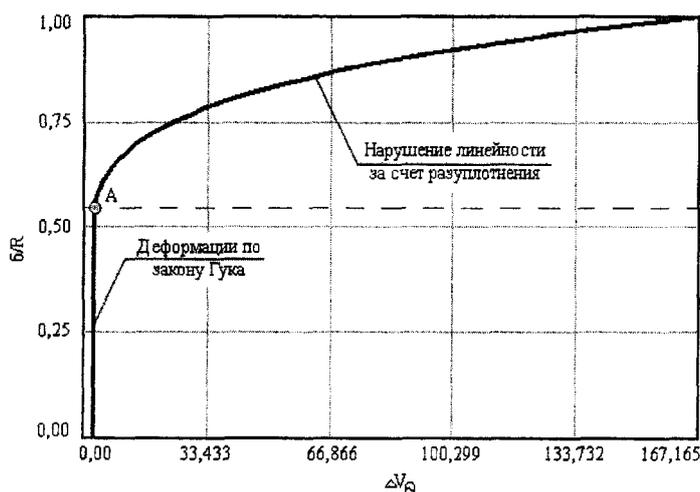


Рисунок 5 – График отклонения суммарного относительного объема сжимаемого элемента от вычисленного по закону Гука в эпоксидном полимербетоне

Линейный размер трещины определялся исходя из предположения ее сферической формы по формуле:

$$L_{crc} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \Delta V_{crc}}{\pi}}. \quad (10)$$

В результате проведенного расчета средний размер структурных трещин при уровне нагружения, соответствующем параметрической точке  $R_m^y$ , составил величину 0,346 мм.

### Выводы

В результате проведенного исследования показано, что процесс микротрещинообразования в структуре бетонных элементов сжатых осевой нагрузкой влияет на коррозионную стойкость и долговечность конструкций, находящихся под напряжением, что особо важно для полимербетонных конструкций.

Нелинейность диаграммы сжатия эпоксидного полимербетона объясняется образованием в материале большого количества микротрещин (более  $600 \text{ см}^3$ ).

Образование микротрещин начинается с самого начала нагружения и интенсивно нарастает сначала по линейной, а затем по экспоненциальной зависимости, вплоть до полного разрушения эпоксидного полимербетона.

Наиболее интенсивное микро-трещинообразование происходит, начиная с уровня нагружения 0,56 от разрушающей нагрузки.

Средний размер микротрещин, образующихся по эпоксидном полимербетоне за весь цикл нагружения, составляет 0,346 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, А.М. Трещиностойкость строительных армополимербетонных конструкций [Текст] / А.М. Иванов, И.И. Ушаков, Н.С. Сова // Сборник докладов Интернационального конгресса по полимербетонам ИКПИК г. Оостенде, Бельгия, 1995.

2. Ушаков, И.И. Оценка структурных повреждений в конструкционных бетонах при сжатии [Текст] / И.И. Ушаков // Материалы III Международных академических чтений «Проблемы обеспечения безопасности строительного фонда России». – Курск: КГТУ, 2004. – С. 124-128.

3. Школьник, И.Э. Диагностика качества бетона: новые аспекты [Текст] / И.Э. Школьник. – М.: 1993. – 328 с.

4. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1961. – 56 с.

#### **Ушаков С.И.**

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж  
Аспирант кафедры «Организация строительства, экспертиза и управление недвижимостью»  
Тел.: +7 (4732) 74-84-53  
E-mail: istroy@inbox.ru

УДК 624.072

ФЕДОРОВ В.С., МЕДНОВ Е.А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАЗРЕЗНЫХ ДВУХПРОЛЕТНЫХ СТАЛЬНЫХ БАЛОК ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*Приведены результаты экспериментальных исследований динамики неразрезных балок при мгновенном разрушении опоры.*

**Ключевые слова:** динамические напряжения, мгновенное разрушение, балка.

*Results of experimental researches of dynamics of not cutting beams are resulted at instant destruction of a support.*

**Keywords:** dynamic pressure, instant destruction, beam.

Цель исследований – анализ динамического поведения статически неопределимых балочных строительных конструкций при мгновенном разрушении опоры.

Исследования проводились на двухпролетных неразрезных стальных балках из профильных труб 40×20×2 по ГОСТ 8645-68. Закрепление на опорах – шарнирное.

Для испытания балок был разработан и изготовлен специальный стенд, включающий опорные устройства и загрузочное приспособление с платформами и штучными грузами. В качестве средней опоры применялась подвеска из круглой стали, передающая нагрузку на поперечную опорную жесткую раму. Между подвеской и рамой устанавливался электромагнит. Схема стенда показана на рисунке 1.

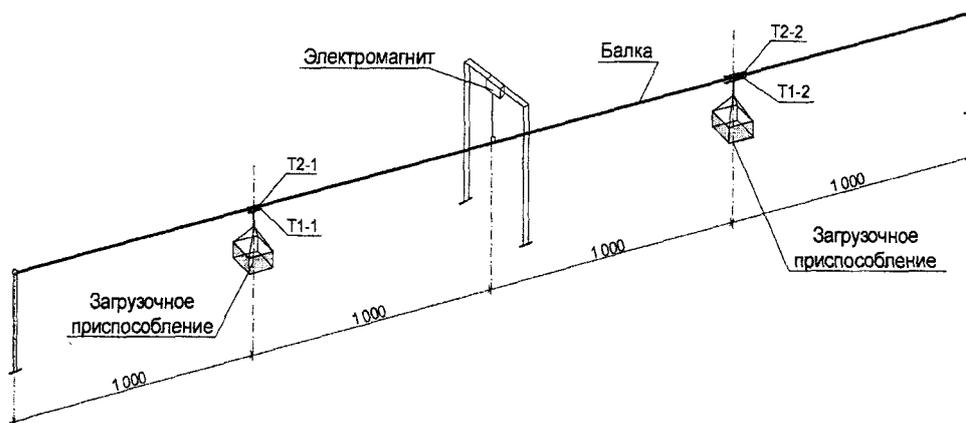


Рисунок 1 – Конструкция стенда и расстановка измерительных приборов

Запроектная нагрузка прикладывалась в виде мгновенного разрушения средней опоры. Технически такое приложение нагрузки осуществлялось путем выключения электромагнита, рассчитанного на усилие отрыва 500 кг.

В процессе испытаний измерялись относительные деформации по нижней и верхней граням сечения в местах приложения сосредоточенных сил.

Измерение динамических характеристик производилось с помощью программно-аппаратного комплекса, состоящего из персонального компьютера и аппаратных средств сбора информации, представляющих собой инструментальные платы аналогово-цифровых

преобразователей и модули фирмы *L-card*. Компьютер оснащен специальным комплексом программ для обработки результатов измерений, называемом *Пакетом обработки сигналов (ПОС)*. К комплексу подключаются датчики. В данном случае в качестве датчиков использовались тензодатчики сопротивления типа КФ 5П1-20-200-Б-12 (сопротивление 199,5 Ом). Калибровка измерительной аппаратуры производилась на тарировочной балке. Программно-аппаратный комплекс и платы *L-card* имеют заключение метрологической экспертизы.

Нагружение балок запроектной нагрузкой проводилось ступенями по следующей методике.

1. При наличии всех опор фиксировались показания тензодатчиков при отсутствии нагрузки.
2. Прикладывалась нагрузка очередной ступени в виде сосредоточенных сил в середине каждого пролета и фиксировались показания тензодатчиков.
3. Включался аппаратный комплекс, отключался электромагнит, и выполнялась запись динамических характеристик колебательного процесса в исследуемых сечениях балки.
4. Снималась нагрузка, восстанавливалась средняя опора, и снова фиксировались показания тензодатчиков.

Величина нагрузки каждой ступени соответствовала 0,1 от теоретической разрушающей нагрузки при расчете балки без промежуточной опоры.

В результате проведенных экспериментальных исследований были выявлены закономерности изменения динамических напряжений в исследуемых сечениях при запроектном воздействии при различных уровнях загрузки.

На рисунке 2 представлена характерная запись колебаний на примере показаний датчика Т1-1, 9-я ступень загрузки.

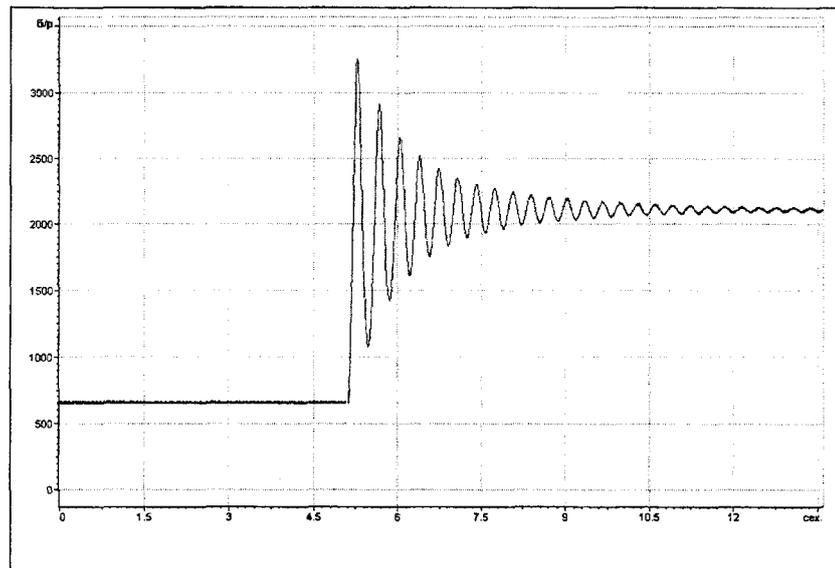


Рисунок 2 – Датчик Т1-1, 9-я ступень загрузки

В работе [1] Г.А. Гениевым предложена методика определения приращений напряжений в элементах стержневых статически неопределимых конструкций при мгновенном разрушении отдельных элементов. По этой методике для упругого материала динамические напряжения в произвольном сечении при выключении одной связи определяются из выражения:

$$\sigma_{n-1}^d = 2\sigma_{n-1}^c - \sigma_n^c, \quad (1)$$

где  $\sigma_{n-1}^c, \sigma_n^c$  – соответственно напряжения, получаемые при расчетах системы с удаленной связью и исходной системы от действия внешней нагрузки.

Формула (1) позволяет определять динамические напряжения, не требуя выполнения расчетов деформируемой конструкции в динамической постановке.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей динамических и статических напряжений, построенные по результатам экспериментальных исследований (датчики в растянутой и сжатой зонах) и расчетов по методу Г.А. Гениева.

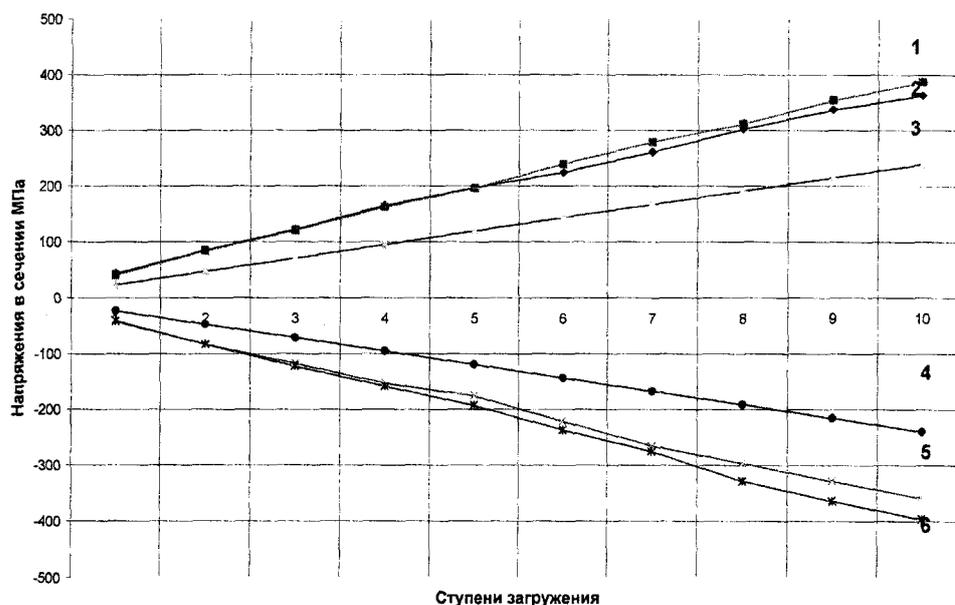


Рисунок 3 – Зависимости динамических и статических напряжений от ступени загрузки: 1 и 6 – динамические напряжения по методу Гениева; 2 и 5 – динамические напряжения по результатам экспериментов; 3 и 4 – статические напряжения после удаления опоры

Исследования показали, что метод Гениева дает удовлетворительные оценки динамических напряжений при мгновенном разрушении опоры. При этом на начальных этапах загрузки динамические напряжения, полученные по результатам эксперимента больше, чем теоретические, а на этапах с 3 по 10 – меньше теоретических. В любом случае погрешность не превышает 8%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при за- проектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. – М.: АСВ, 2004. – 216 с.

**Федоров В.С.**

Московский институт инженеров транспорта, г. Москва  
Доктор технических наук, профессор

**Меднов Е.А.**

Московский институт инженеров транспорта, г. Москва  
Аспирант

УДК 711.42

КУПЦОВА Е.В., КОРШУНОВА Н.Н.

## СИСТЕМЫ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ЭКОПОСЕЛЕНИЙ

*Главные факторы, влияющие на формировании экопоселений, представляют собой сложные многоуровневые системы, которые могут быть поняты как динамическое взаимодействие 2 частей: климатической и антропогенной. Каждая из частей подразделяется на подгруппы. Климатические и антропогенные факторы формируются в зависимости от потребностей и уровня развития общества, градостроительства, экологических, эстетических и социально-экономических решений.*

**Ключевые слова:** экопоселение, факторы воздействия, градостроительство.

*Main factors influencing on formation of ecovillages represent complex multilevel systems that could be realized as dynamic interaction of 2 parts – climatic and anthropogenic. Each of the parts subdivides into a number of subgroups: the first one into natural and climatic factors, anthropogenic formulates depending on needs and level of society development, town-planning solutions, ecological, aesthetic and socio-economic.*

**Keywords:** eco-settlement, influence factors, town-planning.

Основные факторы, влияющие на формирование экопоселений, представляют собой сложную многоуровневую систему, которую автор представляет в виде динамического взаимодействия двух основных частей: *природно-климатической и антропогенной* (таблица 1). Каждая часть, в свою очередь, подразделяется на ряд взаимодействующих подгрупп: *природно-климатическая* – на природные и климатические факторы; *антропогенная* формируется в зависимости от потребностей и уровня развития общества, градостроительных решений, экологических, эстетических и социально-экономических требований.

Экологический подход, как частный случай системного подхода, является методологической базой для разработки представлений о взаимодействии естественной природной и искусственной архитектурной среды с жизнедеятельностью человека. Изучение архитектурной среды как среды, обеспечивающей организацию практически всех основных биологических и социальных процессов жизнедеятельности общества, привело к возникновению архитектурной экологии – науки, обобщившей широкий круг вопросов, изучаемых другими дисциплинами. Основная цель архитектурной экологии заключается в создании такой искусственной архитектурно-ландшафтной среды, в которой гармонично сочетаются интересы природной среды и среды жизнедеятельности человека [1].

Экопоселения (ЭП) призваны обеспечивать гармоничное и комфортное сосуществование человека и природы, снизить экологическое неблагополучие поселений и отыскать пути решения задач по оздоровлению окружающей среды. Это обязывает подходить к вопросу архитектурного формирования поселений с позиции экopoзитивного проектирования при учете всех факторов.

Характер формирования архитектурной среды поселений определяется динамикой положительного и отрицательного воздействия факторов сквозь призму экологичности, а также интенсивностью прямых и обратных связей между ними.



К основным условиям, влияющим на формирование архитектурных решений экологических поселений, автор относит:

**Природно-климатические факторы**, представляющие естественную среду и включающие в себя определенную географическую территорию с присущим ей рельефом, геологическими условиями, ландшафтом и климатическими характеристиками, водными и воздушными бассейнами, флорой и фауной, выполняют двойную функцию, являясь и внешней средой, и средством удовлетворения биологических потребностей.

Природно-климатические факторы влияют непосредственно на систему расселения и выбор территории поселения. Благоприятность территории для размещения селитебной зоны и конкретно – жилой застройки оценивается по качеству рельефа, его расчлененности, уклонам, изрезанности оврагами и промоинами, долинами рек, инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям, климату, минерально-сырьевым и бальнеологическим ресурсам, гидрологическим ресурсам (ресурсы поверхностных вод), почвам и растительности.

Как показывает практика, экопоселения могут создаваться для экотуризма в качестве рекреационных зон и оздоровления. Поэтому наличие таких природных ресурсов как минеральные источники, лечебные грязи и пр. может стать определяющими в назначении поселения и характере застройки.

Геологические условия площадки строительства.

**Рельеф территории.** Основными характеристиками рельефа местности, оказывающими влияние на архитектурно-планировочные решения экопоселений являются величина уклона и его ориентация по сторонам света (экспозиция). Анализ нормативных материалов, практики проектирования и эксплуатации показывает, что наиболее благоприятными являются площадки с южной, юго-восточной и восточной ориентацией склонов. Северная ориентация снижает продолжительность солнечной освещенности территории посредством увеличения падающих теней от строительных и природных объектов.

**Величина уклона рельефа** влияет на трассировку улиц, инженерных сетей, планировочное решение поселения, объемно-композиционные приемы.

Немаловажными являются экологические характеристики геологии участка строительства. Выбор места экопоселения исключает все вредные для человека природные факторы, такие как:

- естественная радиоактивность местности (вблизи залежей и разработок природных ископаемых: железной руды, урана и пр.);
- наличие повышенной концентрации радона, воздействие которого приводит к заболеваниям различного рода;
- геопатогенные зоны, образующиеся над пустотами земли, подземными водными потоками, руслами бывших рек, разломами и пр. В таких местах изменяются геомагнитные поля, уровень радиации, электропроводность почвы и др. параметры [2].

**Гидрологические характеристики территории** учитываются при градостроительном размещении ЭП с позиции обеспечения поселения водой, эстетических и санитарно-гигиенических требований. Должна быть исключена угроза подтопления территории.

Таким образом, геологические и гидрологические условия местности влияют на выбор площадки строительства, соответствующих инженерно-технических мероприятий по подготовке территории.

**Флора и фауна.** Элементы растительного и животного мира играют важную роль в формировании ЭП и в немалой мере оказывают влияние на планировочное решение и архитектурно-художественную выразительность. Эти природные элементы характеризуются сложными биологическими и геохимическими процессами, например, в результате реакции фотосинтеза и кругооборота в природе других элементов участвуют в восстановлении ки-

слорода и воды. Такие природные факторы как флора и фауна оказывают благоприятное воздействие на среду поселения. Растительность в поселении выступает в качестве фитонцидных, ветро- и шумозащитных зеленых полос и вместе с представителями животного мира участвует в формировании замкнутых циклов.

Особое внимание при выборе места строительства новых населенных пунктов следует уделять вопросам максимальной сохранности лесных массивов, играющих роль легких нашей планеты. Лес, формируя ландшафт, создает и соответствующее эстетическое окружение, благоприятно воздействующее на людей.

**Климатические характеристики** выступают одними из основных факторов, оказывающих влияние на архитектуру поселений, в том числе и экопозитивных. К главным составляющим климата местности, влияющим на архитектурно-планировочное решение поселения относятся солнечная радиация, ветер, осадки, атмосферное давление, влажность воздуха.

**Ветер.** Учет силы ветра участвует в формировании объектов строительства, направление ветра – влияет на ориентацию улиц, создание ветрозащитных сооружений и насаждений. Немаловажным для создания экопоселений является возможность использования ветрогенераторов, как один из источников альтернативной энергетики.

**Осадки** в виде снега и дождя учитываются при организации ливневой канализации, создании на территории поселения резервуаров для сбора дождевых вод, которые могут использоваться для с/х или бытовых нужд.

С показателем скорости ветра тесно связаны такие природные явления как объем и направление *снегопереносов*. Эти факторы учувствуют в выборе вида застройки, трассировке улиц, ориентации строительных объектов.

**Активность солнечной радиации** играет значительную роль в формировании архитектурных решений экологически чистых поселений.

**Тепловой режим** местности влияет на формирование застройки ЭП. Объекты необходимо выгодно размещать аккумулялирующими поверхностями к солнечному излучению, одновременно, при необходимости защиты территории поселений от перегрева и высокой влажности, должны устраиваться аэрационные коридоры.

**Световой режим** влияет на размещение зданий относительно солнечных лучей и друг друга. Строительные объекты должны располагаться таким образом, что бы снизить затененность территории. В жаркий период года может возникать необходимость устройства солнцезащиты.

Световой режим и количество солнечных дней в году влияют на возможность использования в структуре поселения гелиоколлекторов, как одной из эффективных систем альтернативной энергетики, дающей возможность самообеспечения поселения электрической энергией.

Продолжительность инсоляции территории регламентируется санитарно-гигиеническими требованиями, как одно из необходимых условий для поселений.

**Влажность воздуха** влияет на выбор места для строительства экопоселения. Участков с туманами в межсезонье необходимо избегать.

Таким образом, при создании поселения элементы природного окружения выступают в качестве естественной основы для его формирования, играя роль объективных факторов и условий, изначально заданных природой и в большей степени определяющих структуру искусственной среды, создаваемой человеком.

**Антропогенные факторы**, образующиеся в результате человеческой деятельности, охватывают структуры техногенного происхождения, включая различные инженерно-технические, архитектурно-строительные, социально-экономические требования. В формировании генеральных планов ЭП они участвуют как элементы создания определенной теоре-

тической модели комфортной среды в конкретных природно-климатических условиях, на определенном научно-техническом уровне развития общества.

*Потребности и уровень развития общества, инженерно-технический прогресс* находятся в постоянном изменении и совершенствовании. Архитектура, создаваемая человеком и для человека, обязана отвечать материальным, социальным и духовным запросам общества, в соответствии с ним видоизменяться, отказываясь от морально устаревающих моделей сооружений и формировать новые. Возможности архитектуры напрямую зависят от материально-технического, социального и интеллектуального уровня развития общества. Уровень развития общества оказывает влияние на все составляющие архитектурной организации пространства: создание системы расселения в целом, формирование видов поселений, размещение и архитектурно-пространственная организация отдельных поселений, развитие номенклатуры сооружений, входящих в их структуру; совершенствование типологических характеристик сооружений.

На сегодня в обществе назревает необходимость в создании экологических поселений как поселений с доступным безопасным видом жилья, обеспеченных развитой инфраструктурой. В таких поселениях подразумевается только безвредное и безотходное производство. Организация этих поселений напрямую зависит от уровня развития экологического мышления всего общества. Стиль жизни, новые технологии и материалы могут не только снизить негативное влияние на природное окружение в процессе производства, эксплуатации и утилизации, но и повысить уровень комфортного проживания.

*Градостроительные решения*, такие как тип поселения, назначение, транспортная доступность, инженерное обеспечение диктуют условия при размещении поселения в структуре населенных мест, оказывают влияние на архитектурно-планировочные решения, вид застройки, зонирование поселения. Отличительной чертой инженерного обеспечения экопоселений является снижение их протяженности вследствие автономности и самообеспечения строительных объектов.

*Экологические приемы*, направленные на энергоэффективность и ресурсосбережение, включающие в себя экотехнологии и системы альтернативной энергетики являются важным элементом экопоселения. Такие элементы природно-климатической подгруппы как интенсивность солнечного облучения, тепловой режим, сила и скорость ветра, наличие геотермальных источников и мн.др. влияют на выбор типа альтернативной энергии. В свою очередь, вид альтернативной энергетики отражается на системе расселения, зонировании и ориентации застройки, объемно-композиционных приемах. Размещение систем альтернативной энергетики (включение или вынос за пределы поселения) оказывают прямое влияние на планировочное решение. Элементы этих систем могут выступать в качестве акцента или фона в композиционной структуре ЭП.

Создание энергоэкономичных и энергоэффективных комплексов на базе использования вторичных и возобновляемых источников энергии снижают негативное антропогенное влияние на окружающую среду и вносят определенные изменения в формирование генеральных планов ЭП.

Природовосстановительные и ресурсосберегающие мероприятия требуют изменения номенклатуры объектов поселения, отвода территории для их размещения. Функциональная схема таких сооружений влияет на их размещение в структуре генерального плана.

*Переработка отходов* жизнедеятельности поселения является неотъемлемой составляющей существования ЭП. Стремление к безотходности жизнедеятельности ЭП приводит к снижению отрицательных антропогенных воздействий на природное окружение. Эти меро-

приятия влияют на размещение в структуре поселения объектов по сбору, переработке и некоторой утилизации ТБО.

Таким образом, перечисленные приемы по экологизации и снижению антропогенной нагрузки на территорию, влияющие на архитектурное формирование ЭП, благотворно воздействуют на внутреннюю среду поселений.

**Социально-экономические факторы**, такие как экономическая доступность, социально-бытовое обслуживание влияют на выбор типа застройки (отдельно-стоящие, блокированные дома), состав будущей инфраструктуры поселения.

Отношения собственности (частная, коллективная, государственная) также оказывает влияние на зонирование поселений в целом, в особенности селитебных зон, планировочной организации, наличие или отсутствие производственной деятельности в структуре жилых зданий и их комплексов. Применительно к развитию архитектуры экопоселений прослеживается влияние отношений собственности на приемы градостроительного размещения жилых зданий, инженерной инфраструктуры и инженерно-технических сооружений, земельных участков, предназначенных для с/х производства и пр. При коллективной собственности чаще всего с/х производство размещается за пределами поселения, при частной собственности – с включением некоторых видов производств в селитьбу.

Состав социально-культурного обслуживания в ЭП вносит изменение в планировочную структуру и типологию жилой застройки, общественных центров и производственных зон. Как правило, экопоселение имеет ограниченные размеры и поэтому элементы социально-культурного обслуживания могут интегрироваться в жилище (жилой дом с частным детским садом, стоматологической клиникой, парикмахерской и т.п.) или в одно здание (многофункциональный общественный центр). При этом необходимо учитывать пешеходную доступность для всех членов поселения.

**Эстетические** требования, предъявляемые к экопозитивным поселениям, во многом зависят от устоявшихся традиций в организации поселений. Эстетические требования оказывают свое воздействие на композиционно-пространственное, композиционно-планировочное, объемно-композиционные решения экопоселения.

Целесообразно применение в объемно-планировочном решении элементов архитектурной бионики с целью использования принципов формообразования живой природы и построения ее структуры для решения не только вопросов архитектурного конструирования, но и организации архитектурного пространства, экологических вопросов, цветосветовой организации среды, а также эстетических поисков [3].

Взаимодействие элементов бионики с имеющимися в распоряжении человека другими средствами поможет преодолеть существующий в архитектуре схематизм организации пространства, недостаточно соответствующий потребностям человека.

Застройка поселения типовыми проектами жилых домов не желательна, следует исключать однотипность и ограничивать примитивизм в экстерьерах жилой застройки. Желательно определять облик поселения на перспективу, особенно при использовании проектов поэтапного строительства – «растущих домов».

Архитектурное пространство является средой для человека, выработанной в процессе развития общества. Перед архитекторами стоит задача в создании всестороннего восприятия среды поселения с рационалистической и эстетической точки зрения, необходимо учесть психологические и физиологические основы эстетического восприятия.

Органичное вписание строительных объектов в природное окружение, композиционные приемы по формированию художественных панорам способствуют образованию благоприятной визуальной среды.

Таким образом, анализ влияния системы факторов на формирование архитектуры экопоселений, основные составляющие которой отражены в таблице 1, показал следующее:

- формирование экопоселения является сложной и многоуровневой системой включающей с себя требования по снижению негативных и грамотному использованию положительных природно-климатических и антропогенных факторов, с учетом биопозитивных знаний и технических возможностей;

- по мнению автора экологической оценке должны подлежать все предпроектные и проектные материалы по созданию биопозитивного поселения, оцениваться потенциал и возможность использования на территории поселений альтернативных возобновляемых источников энергии;

- вариантная проработка и учет всех факторов в проектировании и строительстве ЭП даст существенную экономическую выгоду и положительный социальный эффект.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельникова, Е.В. Архитектурно-композиционные особенности формирования поселений в горных районах Северной Осетии: Дис. канд. архитектуры: 18.00.04 СПб., 2004. – 176 с.

2. Истомин, Б.С. Проблемы архитектуры и строительства в условиях прогнозируемого экологического кризиса [Текст] / Б.С. Истомин // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. – Орел: ОрелГАУ, 2000.

3. Лебедев, Ю.С. Архитектура и бионика [Текст] / Ю.С. Лебедев. – М.: Стройиздат, 1977. – С 217.

**Купцова Е.В.**  
ОАО «ЦНИИПромзданий», г. Москва  
Аспирант  
E-mail: morozovoj@yandex.ru

**Коршунова Н.Н.**  
Российский университет дружбы народов, г. Москва  
Кандидат архитектуры, старший преподаватель  
Тел.: 8 916 688 60 79

УДК 625.731.3:626.862

АНИСИМОВ П.В., МЕВЛИДИНОВ З.А., ЛУКАШЕНКО М.В.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ  
ДРЕНИРУЮЩЕГО СЛОЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

*Проведен анализ водного режима дренирующего слоя дорожной одежды. Разработано техническое решение по повышению эффективности осушения дренирующего слоя на вогнутых участках (кривых) продольного профиля дороги.*

*Ключевые слова: дорожная одежда, дренирующий слой, осушение.*

*The analysis of a water mode sandy layer of road clothes is given. The technical decision on increase of efficiency of drainage sandy layer on concave sites (curves) of a longitudinal structure of a road is developed.*

*Keywords: road clothes, sandy layer, drainage.*

Конструктивные решения по осушению дренирующего слоя дорожных одежд автомобильных дорог относят к дренажным системам. Отвод воды из оснований дорожных одежд может выполняться различными техническими решениями, широко представленными в работах А.Я. Тулаева и отраженными в монографии П.В. Анисимова [1].

Отличительные особенности работы дренажной системы состоят в следующем:

- дренажная система имеет скрытый процесс накопления и отвода воды. Поэтому исключается возможность визуального или иного широкого и качественного наблюдения за работой отдельных ее элементов в наиболее ответственные периоды изменения водного режима и деформационных процессов и оперативное вмешательство по их корректировке. Это затрудняет устанавливать наиболее достоверный приток воды в дорожную одежду, режимы фильтрации ее в дренирующих слоях и прохождение в других элементах дренажной системы.

- после постройки дороги и начала ее эксплуатации происходят непрерывные изменения конструктивно-технических параметров всех элементов дренажной системы. Эти изменения вызывают природно-климатические факторы, колесные нагрузки транспортных средств и совместное их действие. При этом происходят деформации земляного полотна, понижающие дно и ровность дна корыта под дорожной одеждой [2], заиливание песчаного (или иного) дренирующего материала путем взаимопроникновения песчаных и глинистых частиц; заиливание элементов дренажной системы вследствие тиксотропного разжижения влажного грунта; седиментация дисперсных частиц, возникающая в результате воздействий колес автомобилей на неровности покрытия [2], вызывающих вибрационные колебания дорожной конструкции. При этом дисперсные частицы «всплывают» из нижних слоев, распределяясь в пустотах песка, а песчаные частицы перемещаются вниз, занимая освободившийся объем. На расслоение песчаного материала дренирующего слоя оказывает влияние и перепад температур [3]. Процессы замораживания и оттаивания грунта земляного полотна могут привести к образованию пучин и необратимым деформациям дорожной одежды, включая и дренирующий слой.

Взаимодействие различных факторов на элементы дренажной системы изменяют не только параметры конструктивных элементов, но и их физико-технические свойства, опре-

деляющие эффективность фильтрации и отвода воды. Особенно это относится к участкам дорог на затяжных уклонах и к вогнутым участкам продольного профиля дороги.

По данным работы [4] «по боковым кюветам и нагорным канавам вода стекает со скоростью, зависящей от их продольного уклона и степени шероховатости стенок канавы. При скорости течения, меньшей 0,4-0,5 м/с, канава засоряется, в ней возникает застой воды. Поэтому не допускается уклон водоотводных канав менее 2‰». Такие уклоны на большинстве участков автомобильных дорог обеспечены, хотя и в этих случаях требуются дополнительные конструктивно-технические решения по ускорению отвода воды, скапливающейся через определенные расстояния в дренирующем слое.

Однако на вогнутых участках продольного профиля дороги, когда уклон в вершине кривой равен нулю, осушение грунтового основания дорожной одежды затруднено. Вода, фильтрующаяся по дренирующему слою с верховых сторон, в вершине кривой скапливается, не находя выхода на откосы земляного полотна. Объясняется это тем, что в весенний период дорожная одежда и земляное полотно под ней оттаивают быстрее, чем обочины. При этом под дорожной одеждой образуется вогнутый мерзлый донник. Вода из земляного полотна с поверхности покрытия и обочин поступает в дренирующий слой и перемещается с верховой стороны в пониженные участки по направлению продольного уклона. Так как дренирующий слой или дренажные трубчатые выпуски под обочинами имеют отрицательную температуру, они не способны отводить воду. Вода заполняет пустоты дренирующего слоя, накапливается в них, а превышение определенного уровня недопустимо по критерию стабильности дорожной конструкции.

На кафедре автомобильных дорог БГИТА разработана конструкция поперечно перехватывающего дренажа, размещаемого в теле земляного полотна ниже дренирующего слоя, на границе встречных уклонов, т.е. в вершине вогнутой вертикальной кривой с продольным уклоном, равным нулю [1].

Однако такая конструкция имеет недостаток, который заключается в том, что процесс осушения дренирующего слоя в зоне вершины вертикальной кривой замедляется вследствие нулевого уклона у вершины и минимальных величинах продольных уклонов на некотором расстоянии от вершины, зависящем от радиуса вертикальной кривой и граничных уклонов.

Кроме того, для устройства дренирующего слоя применяют пески с низкими значениями коэффициентов фильтрации (менее 10 м/сут.). На вогнутых участках с нулевым уклоном в вершине вертикальной кривой и на подходах с небольшими уклонами фильтрация воды замедляется вследствие понижения гидравлического (пьезометрического) уклона водного потока и, как следствие, снижаются скорости фильтрации и расход воды. Время достижения водным потоком перехватывающего дренажа возрастает, а вогнутый участок вертикальной кривой с малыми уклонами длительное время находится в переувлажненном состоянии, что отрицательно сказывается на прочности земляного полотна, а, следовательно, и дорожной одежды. При этом пустоты материала дренирующего слоя могут быть полностью заполнены водой, что недопустимо при динамических воздействиях на одежду колес автотранспорта.

Для повышения эффективности осушения дренирующего слоя дорожной одежды в период оттаивания конструкции на вогнутых участках продольного профиля с нулевым уклоном в вершине кривой в качестве дренирующего слоя на участке осушения использован материал с коэффициентом фильтрации, превышающим величину коэффициента фильтрации материала на подходах к этому участку, предпочтительно не менее 10 м/сут. При этом расстояние от вершины кривой до границ участков эффективного осушения определяется произведением радиусов кривых на граничные уклоны.

На рисунке 1 показан продольный разрез участка дорожной конструкции на вогнутой кривой, который способен повысить эффективность осушения дренирующего слоя. Конст-

рукция включает покрытие 1, основание 2, дренарующий слой 3 с низким коэффициентом фильтрации и дренарующий слой 4 с повышенным коэффициентом фильтрации, земляное полотно 5 и односкатный поперечный перехватывающий дренаж 6, размещенный в пределах дренающего слоя и ниже его на ширину основания в теле земляного полотна [1].

Дорожная конструкция работает следующим образом. Вода, поступающая в дренарующий слой 3, когда обочины находятся в промерзшем состоянии, перемещается по дренающему слою с верховой стороны в направлении уклона (спуск), достигает материала 4 с повышенным коэффициентом фильтрации, перемещается по нему, перехватывается поперечным дренажом 6 и выводится на откос земляного полотна в низовую сторону местности.

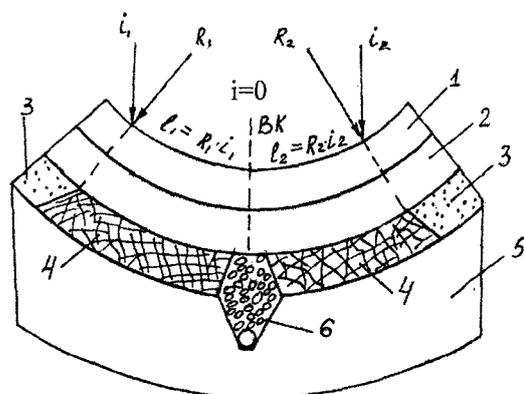


Рисунок 1 – Дорожная конструкция: 1 – покрытие; 2 – основание; 3 – дренарующий слой; 4 – дренарующий слой с повышенным коэффициентом фильтрации; 5 – земляное полотно; 6 – перехватывающий дренаж с трубой; ВК – ширина кривой

Таким образом, вода из дренающего слоя 3 поступает в дренающий слой 4 с большей величиной коэффициента фильтрации, при этом увеличивается скорость фильтрации и расход воды, а, следовательно, и ускоряется осушение дренающего слоя.

Использование технического решения в дорожной конструкции на вогнутых участках продольного профиля с расположением вершины кривой на проектной линии позволяет повысить эффективность осушения дренающего слоя дорожной одежды, при этом коэффициент фильтрации материала в зоне осушения предпочтительно должен составлять не менее 10 м/сут., а расстояние от вершины кривой до границ участков эффективного осушения определяется произведением радиусов кривых на граничные уклоны (уклоны начала эффективного осушения). Предложенная конструкция позволяет предохранить от деформаций и разрушений земляное полотно и дорожную одежду вследствие воздействий колесных нагрузок автотранспорта и возможных знакопеременных температур, встречающихся при оттаивании земляного полотна. Кроме того, на таком участке отпадает необходимость устройства дренающего слоя под обочинами земляного полотна и продольно-поперечной трубчатой дренажной системы для отвода воды.

### Заключение

Проведен анализ водного режима дренающего слоя дорожной одежды. Разработано техническое решение по повышению эффективности осушения дренающего слоя на вогнутых участках (кривых) продольного профиля дороги. Получен патент на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов, П.В. Автомобильные дороги: Методологическая концепция и теоретические основы проектирования и строительства [Текст] / П.В. Анисимов. – Брянск: Грани, 1995. – 132 с.

2. Анисимов, П.В. Особенности водного режима земляного полотна автомобильных дорог на деформированных участках дорожных одежд [Текст] / П.В. Анисимов, З.А. Мевлидинов, А.В. Егорин // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство, транспорт» – Орел.: ОрелГТУ. – 2008. – №4/20 (551). – С. 78-81.

3. Анисимов, П.В. Температурный фактор в деформациях земляного полотна [Текст] / П.В. Анисимов // Материалы II международной научно-технической конференции. Брянск, 11-13 ноября 2003 г. – Брянск: БГИТА, 2004. – С. 32-34.

4. Бабков, В.Ф. Проектирование автомобильных дорог [Текст] / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев: В 2-х ч. Ч. 1: Учебник для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 369 с.

**Анисимов П.В.**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент

Тел.: +7(4832) 74-05-68

**Мевлидинов З.А.**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги»

Тел.: +7(4832) 74-05-68

**Лукашенко М.В.**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск

Аспирант

Тел.: +7(4832) 74-05-68

АУНГ МО ХЕЙН

## ОЦЕНКА ОСАДОК ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЕЙ

*Рассмотрена проблема осадок поверхности грунта, возникающих при проходке тоннелей. Приводятся эмпирические, аналитические и численные методы оценки осадки поверхности грунта при проходке одиночных и двух параллельных тоннелей. Предложен новый метод оценки осадок поверхности грунта, основанный на использовании теоремы взаимности. Приведено сравнение различных методов определения величины и формы кривых, описывающих осадки поверхности.*

**Ключевые слова:** оценка осадок, теорема взаимности.

*The problem of surface soil settlement due to tunnel construction is solved. Elastic solutions are presented to predict surface soil settlement caused by one and two parallel tunnels, by using existing empirical, analytical solutions. The new method of settlement estimation based on the reciprocal theorem is proposed. Numerical analysis by using geotechnical software Plaxis also has been conducted. Comparison of solutions of different methods and resulted surface settlement curves is presented as well.*

**Key words:** estimation of settlement, reciprocal theorem.

В настоящее время из-за ограниченности свободной территории в городских условиях развитие транспортных систем происходит в основном за счет строительства подземных сооружений. Возникает необходимость в выполнении сложных подземных работ, таких как строительство тоннелей, подземных стоянок и других сооружений, которые часто должны быть построены под существующими городскими строениями, в некоторых случаях представляющих историческую ценность.

Возникают проблемы, связанные с последствиями строительства и эксплуатации тоннелей в городских условиях. Эти проблемы проявляются в виде осадок поверхности грунта. Чрезмерные осадки могут вызвать повреждения наземных и подземных сооружений. На состояние старинных зданий могут повлиять даже малые осадки. Оценка величины осадок поверхности грунта в городских условиях являются одной из проблем, которую надо решить при проектировании тоннеля.

В настоящем исследовании излагаются аналитические и численные методы оценки осадки поверхности грунта при проходке одиночных и двух параллельных тоннелей. Приведено сравнение различных методов определения величины и формы кривых, описывающих осадки поверхности. Предложен новый метод оценки осадок поверхности грунта, основанный на использовании теоремы взаимности.

### **1. Расчет с использованием программного комплекса Plaxis**

На первом этапе были выполнены численные расчеты с использованием программного комплекса Plaxis. При расчете учитывалось упругопластическое нелинейное поведение грунта с учетом дренирования и без учета дренирования.

В качестве исходных данных использовались результаты полевых исследований и лабораторных испытаний грунтов, выполненных на этапе подготовки строительства кольцевой линии Сингапурского метрополитена. Это сооружение состоит из двух перегонных тоннелей с наружным диаметром 6,8 м, расположенных на глубине 19,5 м и 18,5 м соответственно. Расстояние между тоннелями 15 м. В таблице 1 и 2 представлены используемые характеристики тоннельной обделки и грунтов.

Таблица 1 – Параметры обделок

Параметр		Ед. изм.	Обделка
Жесткость при сжатии	$EA$	кН	$8,25 \cdot 10^6$
Жесткость при изгибе	$EI$	кНм <sup>2</sup>	$5,199 \cdot 10^4$
Эквивалентная толщина	$d$	м	0,275
Погонный вес	$w$	кН/м	6,000
Коэфф. Пуассона	$\nu$	–	0,15

Таблица 2 – Характеристики грунтов

Параметр	Усл. обоз.	Ед.	Засыпка	$E$ Эстуарный	$F2$ Речная глина	$F1$ Речной песок	$G V$ гранит	$G IV$	$G III$
Удельный вес грунта ниже подземных вод	$\gamma_{sat}$	кН/м <sup>3</sup>	18	14	19	19	20	23	23
Гор. проницаемость	$k_x$	м/день	0,086	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,086	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,086	0,086
Вертикальная про- ницаемость	$k_y$	м/день	0,086	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,086	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,086	0,086
Модуль упругости	$E$	кН/м <sup>2</sup>	$1,2 \cdot 10^4$	5280	8450	$1,4 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$
Коэфф. Пуассона	$\nu$	-	0,3	0,35	0,35	0,3	0,3	0,3	0,3
Сцепление	$c$	кН/м <sup>2</sup>	20	17,6	21,125	0,2	250	250	600
Угол трения	$\varphi$	°	30	22	24	30	34	35	40
Боковое давление	$K_0$	-	0,5	1,0	1,0	0,7	0,8	0,8	0,8
Сила на границе раздела	$R_{inter}$	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

Типичные величины потери объема для тоннелей с диаметрами до 6,6 м в морской глине находятся в диапазоне от 2% до 3,5% в зависимости от способа проходки [1]. В настоящей работе принимается потеря объема в размере 1%.

На рисунке 1 представлены рассчитанные профили осадок. Из графиков видно, что осадки грунтов при проходке двух тоннелей (с потерей объема 1%) в неосушенных грунтах меньше, чем в осушенных грунтах.

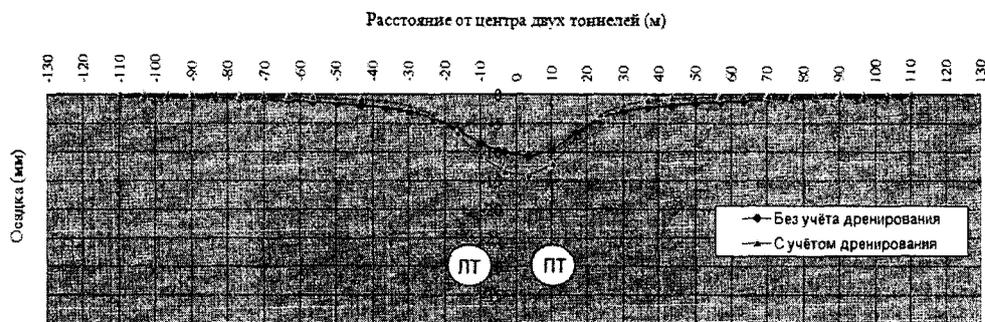


Рисунок 1 – Сравнение профилей осадок с учетом и без учета дренирования (выполнено с использованием вычислительного комплекса Plaxis)

## 2. Функция ошибок Гаусса для оценки осадок поверхности грунта

Для сравнения результатов используется кривая поверхностной осадки грунта с использованием функции ошибок Гаусса [2]. В основу этого метода положено равенство объема поверхностной мульды осадки грунта объему, заполняющему пространство, возникшей

вследствие деформации тоннельной обделки. В частном случае при отсутствии крепи объем мульт равен объему вынутого грунта.

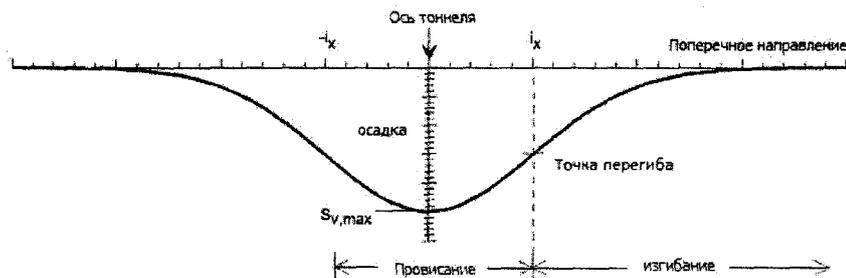


Рисунок 2 – Мульда осадки в поперечном направлении

$$S_v(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4l_x} e^{-\frac{x^2}{2l_x^2}}, \quad (1)$$

где  $V_L$  – потери объема;  $D$  – диаметр тоннеля;  $l$  – параметр ширины мульды, в поперечном профиле осадки.

Параметр ширины мульды ( $l$ ) определен как расстояние точки перегиба (т.е. точка максимального наклона) от оси тоннеля. В работе О'Рейли и Нью [3] получено выражение:

$$l = K \cdot z_0, \quad (2)$$

где  $K = 0,45$  для данного вида породы [0] (эта величина может изменяться в пределах от 0,4 до 0,7 для жесткой и мягкой глины соответственно и принимать значение  $K = 0,25$  для песков;  $z_0$  – глубина заложения тоннеля (расстояние от оси тоннеля до поверхности).

### 3. Метод суперпозиции для оценки осадок при проходке двух тоннелей независимо от их взаимодействия

Для расчета величины поверхности осадки при проходке двух параллельных тоннелей используется метод суперпозиции [4]. Авторы этой работы предложили определить осадку поверхности земли по формуле:

$$S_i = S_{\max A} \exp\left[-\frac{(x+L/2)^2}{2l_A^2}\right] + S_{\max B} \exp\left[-\frac{(x-L/2)^2}{2l_B^2}\right] - S_{AB}, \quad (3)$$

где  $S_{AB} = 0$  – без учета взаимодействия;  $L$  – расстояние между двумя тоннелями (рисунок 3).

Увеличение расстояния между тоннелями вызывает уменьшение осадки в центральной части между тоннелями. Если эти тоннели имеют одинаковые диаметры и потери грунта, тогда  $S_{\max A} = S_{\max B}$  и  $l_A = l_B$ .

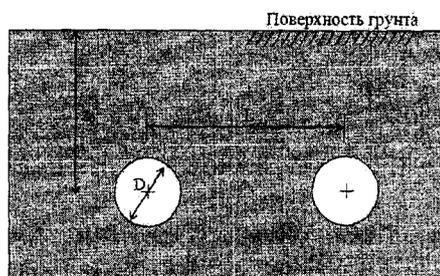


Рисунок 3 – Модель двух тоннелей

Общая осадка поверхности будет определяться выражением:

$$S_r = S_{\max A} \left\{ \exp \left[ -\frac{(x+L/2)^2}{2l^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(x-L/2)^2}{2l^2} \right] \right\} a. \quad (4)$$

На рисунке 4 представлены кривые поверхностных осадок при проходке левого и правого тоннелей и общая осадка при проходке двух параллельных тоннелей с использованием функции ошибок Гаусса и метода суперпозиции.



Рисунок 4 – Профили осадок при проходке левого и правого тоннелей и общая осадка при проходке двух параллельных тоннелей

#### 4. Использование теоремы взаимности для оценки осадок поверхности грунта

Наряду с известными решениями автором разработан аналитический метод оценки осадки поверхности грунта, основанный на теореме взаимности. Для этой цели используются известные аналитические решения перемещений точек грунта упругого полупространства при воздействии вертикальных сил. Исходными данными для вычисления вертикальных перемещений поверхности грунта являются функции перемещений контура полости. Напряжения на контуре обделки определяются из решения Фламанта [5].

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi r} \cos \theta = \frac{2Fz}{\pi r^2}. \quad (5)$$

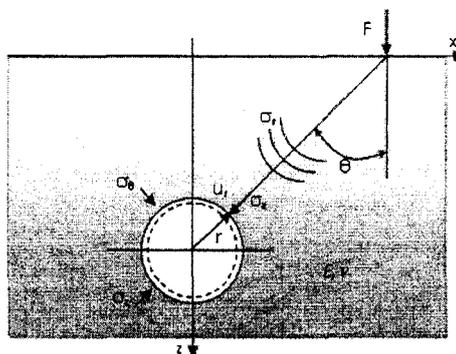


Рисунок 5 – Расчетная схема для определения перемещений в полости при действии вертикальной силы

Нормальные напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль оси тоннеля:  $\sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r$ ; и перпендикулярно направлению  $\theta$ :  $\sigma_\theta = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r$ . Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений перпендикулярно оси цилиндра:

$$u_r = \frac{a\sigma_r}{E} \frac{\nu}{1-\nu} (1+2 \cos 2\theta) \quad \text{при } \theta = 0. \quad (6)$$

Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений перпендикулярно оси цилиндра:

$$u_r = \frac{a\sigma_r \nu}{E(1-\nu)}(1-2\cos 2\theta) \quad (\text{угол } \theta \text{ заменяется на угол } \theta + \pi). \quad (7)$$

Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений вдоль оси цилиндра:

$$u_r = \frac{a\sigma_z \nu}{E} \Rightarrow u_r = \frac{a\sigma_r \nu^2}{E(1-\nu)}. \quad (8)$$

1. Средние радиальные перемещения неподкрепленной цилиндрической полости от силы, приложенной на поверхности земли определяются формулой:

$$\Delta u_r = \Delta u_{r_1} + \Delta u_{r_2} + \Delta u_{r_3}, \quad (9)$$

которое после подстановки выражений для средних радиальных перемещений принимает вид:

$$\Delta u_r = \frac{2a\sigma_r}{E} \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) + \frac{a\sigma_r}{E} \left( \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) = \frac{a\sigma_r \nu(\nu+2)}{E(1-\nu)} \quad \text{или} \quad \Delta u_r = \frac{2aFz\nu(\nu+2)}{E\pi r^2(1-\nu)}. \quad (10)$$

2. Используя теорему взаимности, определим зависимость средних перемещений от распределенной по длине цилиндрической полости (в направлении  $z$ ) силы  $F$ , приложенной внутри полости. Для этой цели определим радиальные перемещения цилиндрической полости от равномерного давления [6]:

$$u(a) = \frac{(1-2\nu)q}{E}. \quad (11)$$

Обозначим средние радиальные перемещения тоннельной обделки от силы  $F$ , приложенной внутри обделки  $\Delta$ . В соответствии с теоремой взаимности можно записать выражение:

$$Fu(a) = q\Delta; \quad F \frac{(1-2\nu)q}{E} = q\Delta \Rightarrow F = \frac{\Delta E}{(1-2\nu)}. \quad (12)$$

Для определения перемещения точек поверхности от силы, приложенной к внутреннему контуру полости, так же используется теорема взаимности.

Обозначим  $u_z$  – вертикальное перемещение поверхности грунта,  $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ ,  $\cos\theta = z/r$ ,  $\sin\theta = x/r$ .

В соответствии с теоремой взаимности имеем:  $Fu_z = \frac{\Delta E}{(1-2\nu)} \Delta u_z$ .

$$\text{Из чего следует } u_z = \frac{2az\nu(\nu+2)\Delta}{\pi r^2(1-\nu)(1-2\nu)}. \quad (13)$$

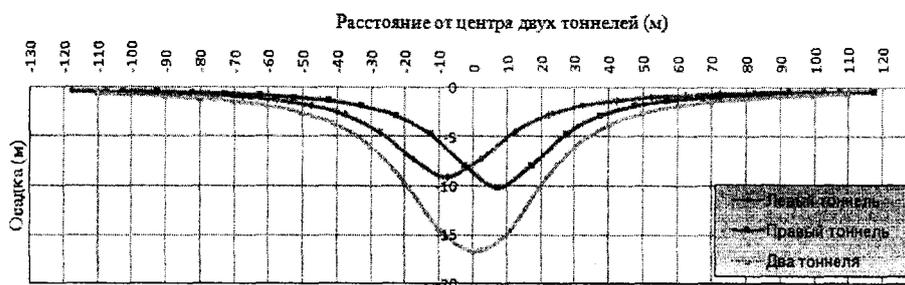


Рисунок 6 – Мульды осадок поверхности грунта при проходе двух тоннелей с использованием метода суперпозиции

### 5. Сравнение кривых мульд осадок

На рисунке 7 показывается сравнение кривых мульд осадок, полученных аналитическими и численными методами, при проходе двух параллельных тоннелей (коэффициент потери объема 1%). Можно также заметить, что профиль осадок, полученный с использова-

нием комплекса Plaxis, совпадает с профилем осадок, полученных с использованием формул ученых Verruijt & Booker (1996). Профили осадок, полученных Loganathan и Poulos (1998), Park (2005) и Гауссовой функции несколько отличаются от предыдущих результатов и данных полевых наблюдений.

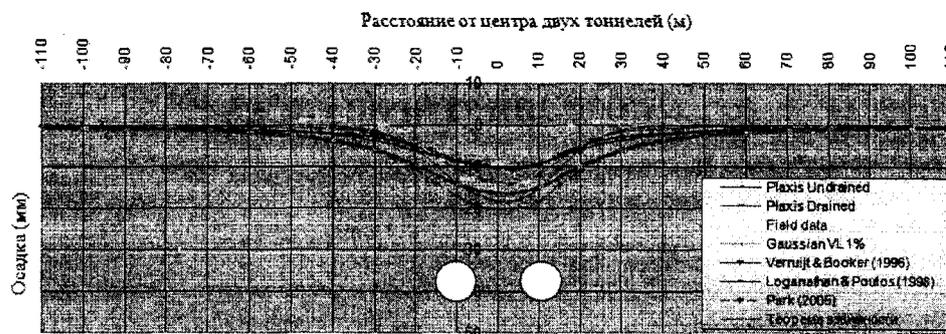


Рисунок 7 – Сравнение всех профилей осадок при проходке двух тоннелей

Сравнение всех профилей осадок показало, что кривая, полученная с использованием теорема взаимности хорошо совпадает с результатам данных полевых наблюдений. Представленные результаты показывают, что аналитические и эмпирические методы достаточно хорошо описывают осадки поверхности грунта.

Тем не менее, для сложных грунтовых условий более подходящим и являются численные методы, позволяющие учесть неоднородность грунтов.

### Выводы

1. Оценка величины возможных осадок поверхности грунта является очень важной проблемой при проектировании тоннелей.
2. Важно знать причину появления осадок.
3. При проходке тоннелей под зданиями, представляющими историческую ценность, кроме теоретических оценок необходим инструментальный контроль в натуральных условиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Civil design criteria for road and rail transit systems, Rail and Engineering Groups, Singapore, 2009.
2. Peck, R.B. 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Pages 225-290 of: Proc. of the 7th int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the art volume. Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A.C.
3. O'Reilly, M.P., New, B.M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. Pages 55-64 of: Tunneling 82. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
4. Wang, J.G., Kong, S.L., Leung, C.F. (2003). Twin Tunnels-Induced Ground Settlement in Soft Soils. Geotechnical Engineering in Urban Construction, Tsinghua University Press, pp.241-244.
5. Verruijt, A., 1994-2005. Soil Dynamics – Elastostatics of a half space, P. 138-139.
6. Timoshenko.S., Goodier.J.N., 1951. Theory of Elasticity – 83. The Reciprocal Theroem, Pages 239-241.

Аунг Мо Хейн

Московский государственный университет путей сообщения,

Аспирант кафедры «Подземные сооружения»

Тел.: +7 (499) 978-40-75

E-mail: usd.miit@gmail.com

УДК 625.731.1.042

КОКОДЕЕВА Н.Е.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ И ТЕМПОВ ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА В РАСЧЕТНЫЙ ПЕРИОД ГОДА (С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ РИСКА)

*Рассматривается математический аппарат теории риска для определения срока службы дорожной одежды и темпов ее разрушения с учетом изменения влажности грунта в расчетный период года.*

*Ключевые слова:* дорога, риск, безопасность, качество, влажность, разрушение.

*The mathematical device of the theory of risk for definition of service life of road clothes and rates of its destruction in view of change of humidity of a ground during the settlement period of year is considered.*

*Keywords:* road, risk, safety, quality, humidity, destruction.

В целях обеспечения выполнения законов №184-ФЗ «О техническом регулировании» и №257-ФЗ "Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации", требующих эксплуатационные характеристики оценивать с учетом технических регламентов на основе оценки степени риска и оценки степени причинения ущерба, необходима разработка нормативно-методического обеспечения (сводов правил, отраслевых норм и рекомендаций, стандартов организаций), который учитывает обозначенную законами проблему.

Настоящая статья затрагивает с научной точки зрения подобные задачи, решения которых основаны на деятельности научной школы под руководством проф. В.В. Столярова в Саратовском государственном техническом университете (СГТУ).

Заведующий кафедрой «Строительство дорог и организация движения» СГТУ д.т.н., проф. В.В. Столяров многие годы ведет активную научно-исследовательскую деятельность в области обеспечения безопасности транспортных сооружений на стадии проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции и ремонта, а также в области повышения безопасности дорожного движения на основе теории риска. Его монографии, учебные пособия, статьи в области обеспечения надежности транспортных сооружений и безопасности движения широко используются на производстве, а также в учебном процессе ВУЗов. В.В. Столяров является руководителем нового научного направления: «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог по условию обеспечения безопасности движения с учетом теории риска». В рамках научной школы защищены диссертационные работы и проводятся научные исследования по следующим вопросам:

- разработка методов оценки риска и надежности вложения средств (инвестиций) в транспортные проекты;
- создание методов оценки фактического срока службы и риска (темпа) разрушения дорожной одежды;
- разработка теории управления состоянием конструкции с позиции теории риска;
- создание методов проектирования геометрических элементов автомобильных дорог по допустимой величине риска возникновения ДТП (заноса, столкновения, наезда и опрокидывания автомобилей).

В данной статье автором решены некоторые вопросы в области технического регулирования, в частности, в области разработки и совершенствования нормативно-технической базы применительно к дорожным конструкциям, которые широко используются в дорожном строительстве [3-12].

Меры, предпринимаемые дорожно-эксплуатационными и ремонтными службами по предотвращению разрушения дорожных конструкций, базируются на неполной информации о состоянии дорожных одежд. Такое положение вызвано тем, что в существующих методах оценки качества дорожных одежд, как правило, игнорируются индивидуальные особенности дорожных конструкций или учитываются только осредненные показатели их состояния. Это приводит к противоречию при назначении сроков ремонтных работ.

Установлено, что наибольшее ослабление несущей способности дорожных одежд наблюдается в неблагоприятный период года. Основной причиной этому служит переувлажнение грунтов земляного полотна грунтовыми и поверхностными водами. К тому же интенсивному нарастанию деформаций и разрушений дорожных одежд способствует воздействие транспортной нагрузки (характеризуемое интенсивностью и составом движения). Все это приводит к сокращению срока службы дорожных одежд и увеличению темпа их разрушения. Для правильного установления сроков ремонтных работ необходимо разработать методику прогнозирования состояния дорожных одежд на любой период времени с учетом перечисленных выше факторов, влияющих на качество дорожных конструкций.

В связи с этим вопрос о повышении эффективности методов оценки качества дорожных одежд нежесткого типа является актуальным.

Проблемами анализа состояния дорожных одежд нежесткого типа занимались видные ученые, в результате чего была создана система оценки эксплуатационного состояния дорог, включающая изучение закономерностей изменения показателей состояния дорог во времени, планирование ремонтных работ и т.п. По своему характеру эти модели можно разделить на детерминированные, учитывающие конкретную количественную информацию о состоянии дорожных конструкций, и стохастические, учитывающие математическое ожидание параметров дорожных одежд и фактический разброс показателей при определении прочности конструкции. Так как показатели эксплуатационного качества относятся к стохастическим величинам, то их следует оценивать вероятностно-статистическими методами. Наиболее распространенной оценкой изменчивости показателей являются среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. Проф. В.А. Семеновым в результате проведенных исследований получены значения коэффициентов вариации параметров [1], при которых обеспечиваются различные уровни качества дорожных одежд. В дальнейшем эти данные использовались в разработанной проф. В.В. Столяровым теории риска [2], позволяющей количественно оценивать состояние дорожных одежд на любой период времени по следующим показателям:

- по риску разрушения дорожных одежд;
- по фактическому сроку службы дорожных одежд;
- по риску пластических сдвигов в малосвязных слоях одежды;
- по риску нарушения сплошности в монолитных слоях при изгибе.

Однако в теории риска недостаточное внимание уделено изучению влияния колебаний влажности грунта земляного полотна (в неблагоприятный период года) на перечисленные выше показатели. Поэтому необходимо исследовать эти процессы при усовершенствовании теории риска.

Разработана модель, описывающая влияние колебаний влажности грунта земляного полотна на прочностные параметры конструкции дорожной одежды. Модель предназначена для оценки состояния существующих дорожных одежд нежесткого типа по их:

- фактическому сроку службы;
- темпу разрушения на любой период эксплуатации автомобильной дороги;
- вероятности нарушения сплошности в монолитных слоях при изгибе;
- риску переувлажнения грунта относительно оптимальной влажности.

В предложенной математической модели влияние влажности грунта земляного полотна на состояние дорожных одежд выражается через коэффициенты  $\gamma$ , учитывающие снижение однородности эквивалентного модуля упругости во времени. Численные значения коэффициентов  $\gamma$  получены в результате определения сроков службы дорожных одежд ( $t_{\phi}$ ) в зависимости от:

- величины коэффициента вариации требуемого модуля упругости ( $C_V^{mp}$ );
- капитальности дорожной одежды;
- влажности рабочего слоя земляного полотна в расчетный период года.

В таблицах 1-3 приведены значения коэффициентов  $\gamma$  для дорожных одежд различной капитальности.

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициентов  $\gamma$  для капитальных дорожных одежд с усовершенствованным покрытием

$C_V^{mp}$	Коэффициенты $\gamma$ при весенней влажности грунта земляного полотна (в долях от $W_T$ )							
	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
0,19	0,028	0,029	0,030	0,034	0,043	0,061	0,092	0,185
0,18	0,024	0,024	0,025	0,028	0,036	0,051	0,074	0,158
0,17	0,020	0,020	0,021	0,024	0,029	0,041	0,062	0,13
0,16	0,017	0,0175	0,018	0,02	0,024	0,034	0,051	0,102
0,15	0,014	0,0146	0,0152	0,016	0,020	0,028	0,041	0,083
0,14	0,012	0,0124	0,0128	0,015	0,017	0,023	0,034	0,066
0,13	0,010	0,0104	0,0108	0,011	0,014	0,020	0,028	0,055

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициентов  $\gamma$  для облегченных дорожных одежд с усовершенствованным покрытием

$C_V^{TP}$	Коэффициенты $\gamma$ при весенней влажности грунта земляного полотна (в долях от $W_T$ )							
	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
0,15	0,042	0,045	0,050	0,057	0,068	0,098	0,162	0,332
0,14	0,038	0,039	0,042	0,049	0,058	0,082	0,139	0,285
0,13	0,033	0,034	0,035	0,039	0,049	0,071	0,119	0,241
0,12	0,029	0,030	0,031	0,032	0,041	0,058	0,095	0,201
0,11	0,024	0,025	0,027	0,028	0,034	0,051	0,080	0,164
0,10	0,022	0,0225	0,023	0,024	0,029	0,044	0,069	0,136
0,09	0,019	0,0195	0,020	0,021	0,024	0,036	0,058	0,110
0,08	0,017	0,0175	0,018	0,019	0,021	0,030	0,049	0,094
0,07	0,016	0,0165	0,017	0,018	0,019	0,029	0,041	0,083
0,06	0,015	0,0155	0,016	0,017	0,018	0,024	0,028	0,078

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициентов  $\gamma$  для дорожных одежд переходного типа с щебеночным и гравийным покрытием

$C_V^{TP}$	Коэффициенты $\gamma$ при весенней влажности грунта земляного полотна (в долях от $W_T$ )							
	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
0,09	0,376	0,409	0,470	0,522	0,671	0,940	1,253	1,880
0,08	0,320	0,345	0,382	0,440	0,550	0,733	1,000	1,466
0,07	0,276	0,290	0,325	0,376	0,473	0,592	0,790	1,104
0,06	0,240	0,252	0,284	0,325	0,410	0,503	0,640	0,866
0,05	0,211	0,221	0,251	0,285	0,361	0,436	0,560	0,705
0,04	0,188	0,199	0,224	0,257	0,321	0,393	0,480	0,615
0,03	0,170	0,181	0,206	0,234	0,234	0,358	0,425	0,523

Для прогноза разрушения дорожной одежды и фактического срока службы получена формула изменения эквивалентного модуля упругости во времени:

$$E_{ЭТ(t)} = E_{ЭТ} \left( 1 - \frac{C_V^{ЭТ}}{C_V^{ЭТ(t)}} \cdot \gamma \cdot t \right), \quad (1)$$

где  $E_{ЭТ}$  – приведенное к расчетной температуре среднее значение эквивалентного модуля упругости на участке обследования и установленное методами математической статистики, МПа;  $C_V^{ЭТ}$  – коэффициент вариации приведенного к расчетной температуре эквивалентного модуля упругости на момент обследования;  $C_V^{ЭТ}(t)$  – коэффициент вариации приведенного к расчетной температуре эквивалентного модуля упругости в  $t$ -м году;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий снижение однородности эквивалентного модуля упругости во времени, 1/годы;  $t$  – период времени, спустя который эквивалентный модуль упругости принимает значение  $E_{ЭТ}(t)$ , годы.

Использование данной модели показало (рисунки 1 и 2), что:

- с увеличением влажности грунта земляного полотна срок службы дорожных одежд сокращается, а темп их разрушения нарастает (см. рис. 1);

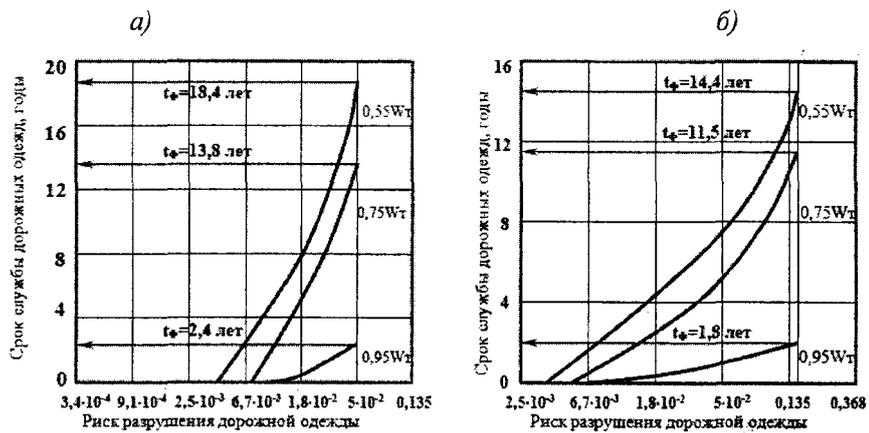


Рисунок 1 – Влияние колебаний влажности грунта земляного полотна на срок службы и риск разрушения дорожной одежды: а – капитального типа с усовершенствованным покрытием; б – облегченного типа с усовершенствованным покрытием

- с повышением однородности эквивалентного модуля упругости (при снижении коэффициента вариации параметра  $E_{ЭТ}$ ) срок службы дорожных одежд возрастает, а темп их разрушения снижается (см. рис. 2);

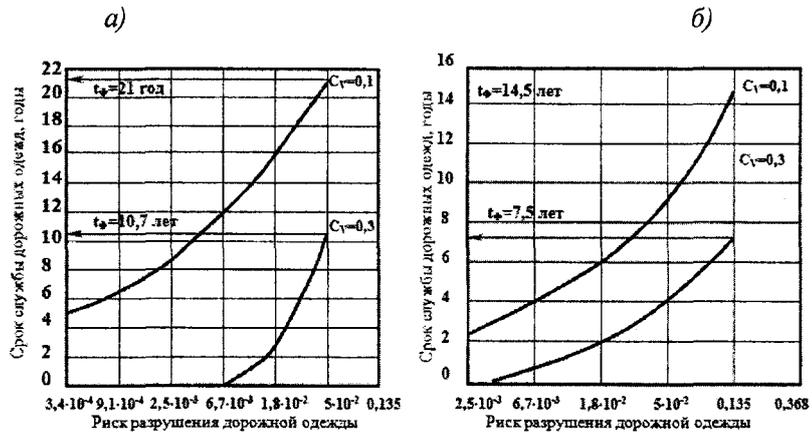


Рисунок 2 – Влияние качества дорожных одежд на срок службы и риск разрушения: а – дорожная одежда капитального типа с усовершенствованным покрытием; б – дорожная одежда облегченного типа с усовершенствованным покрытием

- чем выше капитальность дорожных одежд, тем больше их срок службы и менее интенсивен темп разрушения при одной и той же влажности грунта земляного полотна (рисунок 1, а, б) и при одном и том же параметре  $C_V^{ЭТ}$  (см. рис. 2, а, б).

Было выполнено обследование существующих дорожных одежд нежесткого типа с целью оценки их эксплуатационного состояния на основе математических моделей теории риска по оставшемуся сроку службы конструкций и темпам их разрушения. Кроме того, ставилась задача проверки адекватности результатов моделирования некоторым натурным данным. Анализ состояния и условий работы дорожных одежд выполнен для ряда дорог Саратовской области. Оценку фактической прочности дорожных одежд выполняли по критерию упругого прогиба. Общепринятую методику обследования и обработки результатов наблюдений использовали с учетом небольших изменений:

- длину локальных участков при разбивке существующей дороги не нормировали, а ограничивали видами и объемами деформаций (разрушений) дорожных одежд;

- измерение прогибов дорожной одежды выполняли на всех полосах наката и на оси проезжей части, а число измерений на каждом участке назначали в соответствии с требованиями математической статистики;

- для приведения результатов измерения к сопоставимому виду использовали приведение фактических модулей упругости к модулям, соответствующим расчетной температуре покрытия (+10°C), при которой происходит наибольшая потеря прочности конструкции в расчетный период. Эту корректировку выполняли с использованием графика "время измерения температуры покрытия – температура";

- влияние влажности грунта земляного полотна на темп разрушения и оставшийся срок службы дорожной одежды учитывали с использованием соответствующих коэффициентов  $\gamma$  (см. табл. 1-3).

В результате обследования были определены границы характерных участков дороги по деформациям, смене конструкции дорожной одежды, наличию и виду источника увлажнения, особенностям расположения участков дорог в продольном профиле. При обработке экспериментальных данных установлены:

- фактические вероятности разрушения ( $r_1$ ) участков дорожных одежд по величине разрушенной площади;

- вероятности разрушения покрытия ( $r_2$ ) по предложенным моделям с учетом влияния на дорожную конструкцию влажности грунта земляного полотна.

При оценке темпов разрушения оказалось, что величины  $r_1$  и  $r_2$  имеют значения одного порядка, а соответствующие им величины уровней надежности ( $K_{Н1}$  и  $K_{Н2}$ ) близки друг другу (см. табл. 2). Это свидетельствует о достаточном уровне сходимости экспериментальных и теоретических (полученных по предложенным моделям) результатов.

Использование теоретических моделей позволило установить оставшиеся сроки службы ( $t_{\phi}$ ) для каждого участка дороги. Полученные величины  $r$  и  $t_{\phi}$  имеют хорошее соответствие друг другу (таблица 4), т.е. большим значениям риска разрушения дорожных одежд соответствуют малые фактические сроки службы до капитального ремонта и, наоборот, с уменьшением риска разрушения увеличиваются сроки службы.

С целью оценки качества дорожных одежд, данные обследований были обработаны для определения их неоднородности. Выполнено сопоставление с предложенной проф. В.А. Семеновым градацией рекомендуемых значений коэффициентов вариации параметров дорожных одежд с фактическими по обеспеченному уровню качества (таблица 5).

Сравнение экспериментальных данных с рекомендуемыми значениями показало, что качество дорожных одежд обследуемых участков соответствует, в основном, удовлетворительному и неудовлетворительному состояниям, реже – хорошему и отличному.

В течение трех лет велись наблюдения за изменением эквивалентного модуля упругости на участках автомобильной дороги Елшанка – Песчаный Умет, характеризующихся раз-

личными влажностями грунтов земляного полотна и уровнями качества дорожных одежд. В результате выполненных исследований получили экспериментальные значения эквивалентных модулей упругости на покрытии за три года обследования. Определяли фактические средние значения модулей упругости  $E_{ЭТ(t)}^Ф$  в год  $t$ . По формуле (1) вычисляли теоретические значения эквивалентного модуля упругости  $E_{ЭТ(t)}^Т$  в году  $t$ . Сопоставление величин  $E_{ЭТ(t)}^Ф$  с теоретическими данными  $E_{ЭТ(t)}^Т$  показало хорошую сходимость (рисунок 3).

Таблица 4 – Фрагмент сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований для автомобильной дороги Аткарск-Песчанка

Участок дороги от ПК + до ПК +	$r_1$	$r_2$	Расхождение, % $\frac{K_{H1} - K_{H2}}{K_{H1}} \cdot 100\%$	$t_{\phi}$ , года
	$\frac{\quad}{K_{H1}}$	$\frac{\quad}{K_{H2}}$		
0+00 – 5+00	$\frac{3,47 \cdot 10^{-2}}{0,9653}$	$\frac{4,2 \cdot 10^{-2}}{0,9580}$	0,76	9
5+00 ÷ 18+00	$\frac{0,205}{0,7950}$	$\frac{0,239}{0,7610}$	4,20	→0
18+00 – 60+00	$\frac{\rightarrow 1}{\rightarrow 0}$	$\frac{\rightarrow 1}{\rightarrow 0}$	→0	→0
60+00 – 77+25	$\frac{4,36 \cdot 10^{-2}}{0,9564}$	$\frac{3,84 \cdot 10^{-2}}{0,9616}$	0,54	10
77+25 – 98+50	$\frac{3,22 \cdot 10^{-2}}{0,9678}$	$\frac{2,42 \cdot 10^{-2}}{0,9758}$	0,83	8
98+50 – 141+50	$\frac{2,8 \cdot 10^{-2}}{0,9720}$	$\frac{2,28 \cdot 10^{-2}}{0,9772}$	0,53	7
141+50 – 174+50	$\frac{2,4 \cdot 10^{-2}}{0,9760}$	$\frac{2,6 \cdot 10^{-2}}{0,9740}$	0,21	5

Таблица 5 – Сравнение значений коэффициентов вариации  $C_V$

Оценка качества дорожных одежд по коэффициенту вариации на экспериментальных участках		Коэффициент вариации и состояние участка				
		ширины проезжей части	ширины обочин	толщины слоя щебня	толщины слоя асфальтобетона	модуля упругости на слое асфальтобетона
Шкала проф. В.А. Семенова	отличное	< 0,01	< 0,09	< 0,12	< 0,10	< 0,12
	хорошее	0,01-0,02	0,09-0,14	0,12-0,22	0,10-0,22	0,12-0,20
	удовлетворительное	0,02-0,03	0,14-0,22	0,22-0,31	0,22-0,34	0,20-0,27
	неудовлетворительное	> 0,03	> 0,22	> 0,31	> 0,34	> 0,27
а/д Сызрань – Саратов – Волгоград		$\frac{0,13}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,15}{\text{удовл.}}$	$\frac{0,09}{\text{отл.}}$	$\frac{0,02}{\text{отл.}}$	$\frac{0,14}{\text{хор.}}$
а/д Песчаный Умет – Елшанка		$\frac{0,05}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,37}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,37}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,02}{\text{отл.}}$	$\frac{0,13}{\text{хор.}}$
а/д Аткарск – Песчанка		$\frac{0,12}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,40}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,21}{\text{хор.}}$	$\frac{0,39}{\text{неудовл.}}$	$\frac{0,42}{\text{неудовл.}}$

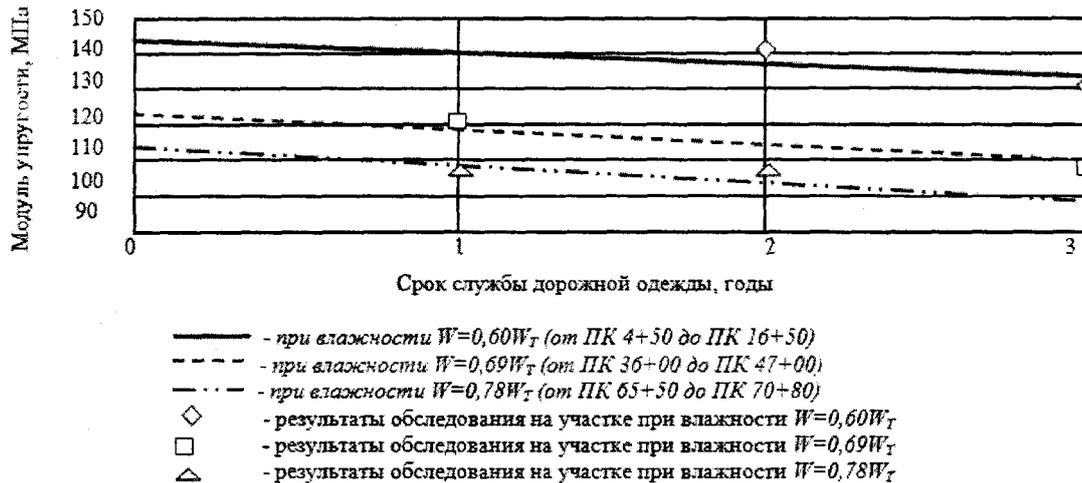


Рисунок 3 – Изменение эквивалентного модуля упругости во времени (а/д Елшанка-Песчаный Умет)

На основе выполненных исследований установили, что сокращение сроков службы дорожных одежд и повышение темпов их разрушения зависят от качества дорожных одежд (от параметров однородности эквивалентного модуля упругости), средней величины фактического модуля упругости и влажности грунта земляного полотна, выраженной коэффициентами  $\gamma$ . Этот факт подтверждает достоверность полученных значений  $\gamma$ .

Из изложенного можно сделать вывод, что выполненные экспериментальные исследования подтверждают достоверность разработанной модели оценки состояния дорожных одежд, основанной на теории риска.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов, В.А. Качество и однородность автомобильных дорог [Текст] / В.А. Семенов. – М.: Транспорт, 1989. – 125 с.
2. Столяров, В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска [Текст] / В.В. Столяров. – Саратов: СГТУ, 1994.
3. Столяров, В.В. Влияние влажности на прочностные характеристики дорожной одежды с позиции теории риска [Текст] / В.В. Столяров, Н.Е. Кокодеева // Эксплуатация современного транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 150-154..
4. Кокодеева, Н.Е. Анализ эксплуатационного состояния дорожных одежд нежесткого типа [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Проблемы транспортного строительства и транспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 9-15.
5. Кокодеева, Н.Е. Учет влажности грунта при оценке фактического срока службы дорожной одежды нежесткого типа и вероятности ее разрушения с использованием теории риска [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Современные проблемы дорожно-транспортного комплекса: тез. докл. 1-й междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на Дону: РГСУ, 1998. – С. 113-115.
6. Кокодеева, Н.Е. Исследование существующих дорожных одежд с целью оценки их прочности [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Актуальные проблемы эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1998. – С.133-136.

7. Кокодеева, Н.Е. К определению поля влажности грунта в рабочем слое земляного полотна при высоком уровне грунтовых вод [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Актуальные проблемы транспорта России: труды междунар. науч.-практич. конф. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 121-126.

8. Кокодеева, Н.Е. Влияние влажности подстилающего слоя грунта на вероятности нарушения сплошности монолитного слоя при изгибе [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Актуальные проблемы эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2000. – С. 139-144.

9. Кокодеева, Н.Е. Изменение влажности грунта в теле земляного полотна / Н.Е. Кокодеева // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2003. – С. 173-179.

10. Кокодеева, Н.Е. Регулирование высокого уровня грунтовой воды в весенний период года [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 95-98.

11. Кокодеева, Н.Е. О законе распределения влажности грунта в теле земляного полотна [Текст] / Н. Е. Кокодеева // Проблемы транспорта и транспортного строительства: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 37-43.

12. Кокодеева, Н.Е. Управление влажностью грунта земляного полотна в весенний период года с целью повышения срока службы дорожной одежды [Текст] / Н.Е. Кокодеева // Новости в дор. деле : науч.-техн. информ. сб. – М.: ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР», 2005. – С. 1-10.

**Кокодеева Н.Е.**

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство дорог и организация движения»

Тел.: +7 (8452) 56-05-44, 52-63-21, 8-909-330-6508

E-mail: natali\_1974\_1111@mail.ru

## Научные специальности

Аспирантура		
Шифр	Наименование специальности	Научный руководитель
01.02.04	Механика деформируемого твердого тела	В.Г. Малинин Н.А. Малинина В.А. Гордон В.С. Шоркин А.В. Коробко
01.02.06	Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры	В.И. Чернышев Л.С. Ушаков Л.А. Савин Д.Н. Ешуткин
01.04.10	Физика полупроводников	В.Ф. Харламов
01.04.17	Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва	В.Ф. Харламов
03.00.16	Экология	С.А. Куценко В.С. Громова
05.02.01	Материаловедение	С.А. Куценко
05.02.02	Машиноведение, системы приводов и детали машин	Л.А. Савин
05.02.08	Технология машиностроения	Ю.С. Степанов А.В. Киричек Г.А. Харламов А.С. Тарапанов А.В. Катунин
05.02.11	Методы контроля и диагностика в машиностроении	С.Ф. Корндорф К.В. Подмастерьев Т.И. Ногачева
05.02.22	Организация производства	К.В. Подмастерьев
05.03.01	Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки	Ю.С. Степанов А.В. Киричек Г.А. Харламов А.С. Тарапанов А.В. Катунин
05.03.05	Технологии и машины обработки давлением	В.А. Голенков С.И. Вдовин С.Ю. Радченко Н.В. Петров О.В. Дорофеев
05.05.04	Дорожные и строительные машины	А.Н. Новиков
05.11.13	Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	С.Ф. Корндорф К.В. Подмастерьев Т.И. Ногачева В.В. Мишин Е.В. Пахолкин
05.11.17	Приборы, системы и изделия медицинского назначения	К.В. Подмастерьев

05.13.05	Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления	М.Т. Прасов
05.13.06	Автоматизация технологических процессов и производств	Ю.В. Колоколов А.И. Суздальцев С.Л. Косчинский
05.13.18	Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	И.С. Константинов В.Т. Еременко О.А. Савина А.В. Коськин
05.16.04	Литейное производство	С.А. Купенко С.Ю. Радченко
05.18.01	Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства	В.В. Румянцева Е.А. Кузнецова
05.18.07	Биотехнология пищевых продуктов	Е.А. Кузнецова
05.18.12	Процессы и аппараты пищевых производств	В.П. Корячкин
05.18.15	Товароведение пищевых продуктов	Т.Н. Иванова Е.Н. Артемова
05.19.04	Технология швейных изделий	Ю.Н. Некрасов Е.Н. Ковешникова М.В. Родичева
05.20.03	Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве	А.Н. Новиков
05.22.10	Эксплуатация автомобильного транспорта	А.Н. Новиков
05.23.01	Строительные конструкции, здания и сооружения	В.И. Коробко В.И. Колчунов В.М. Бондаренко А.И. Никулин
05.23.05	Строительные материалы и изделия	М.Ю. Малькова Ю.И. Гончаров
05.23.17	Строительная механика	А.В. Коробко В.И. Коробко
05.26.01	Охрана труда	В.И. Чернышев Ю.Х. Поландов А.П. Лапин
08.00.01	Экономическая теория	В.Ф. Бондарев В.Т. Смирнов
08.00.05	Экономика и управление народным хозяйством	В.П. Лукин С.А. Никитин О.А. Савина В.Г. Садков Л.А. Попова С.А. Измалкова
08.00.10	Финансы, денежное обращение и кредит	В.Г. Садков
08.00.12	Бухгалтерский учет и статистика	Л.В. Попова В.Г. Садков

09.00.01	Онтология и теория познания	А.М. Старостенко
09.00.11	Социальная философия	А.М. Старостенко
12.00.02	Конституционное право; муниципальное право	А.А. Ковалкин Б.П. Носков В.Е. Сизов П.А. Астафичев
12.00.03	Гражданское право; предпринимательское право; семейное право; международное частное право	А.И. Дихтяр
12.00.08	Уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное право	Б.В. Петухов Г.В. Назаренко Г.Т. Козлов
12.00.14	Административное право; финансовое право; информационное право	А.Л. Пашин Т.А. Гусева
12.00.15	Гражданский процесс; арбитражный процесс	А.И. Дихтяр
13.00.08	Теория и методика профессионального образования	Е.Н. Ковешникова В.С. Макеева Б.Г. Бобылев
18.00.02	Архитектура	Т.Н. Колесникова
22.00.08	Социология управления	А.М. Старостенко Н.А. Фролова

<b>Докторантура</b>		
<b>Шифр</b>	<b>Наименование специальности</b>	<b>Научный руководитель</b>
01.02.04	Механика деформируемого твердого тела	В.А. Гордон В.С. Шоркин А.В. Коробко В.Г. Малинин Н.А. Малинина
01.02.06	Динамика: прочность машин, приборов и аппаратуры	В.И. Чернышев Л.С. Ушаков Л.А. Савин Д.Н. Ешуткин
05.03.05	Технологии и машины обработки давлением	В.А. Голенков С.И. Вдовин
05.05.04	Дорожные и строительные машины	А.Н. Новиков
05.11.13	Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	С.Ф. Корндорф К.В. Подмастерьев
05.13.06	Автоматизация технологических процессов и производств	Ю.В. Колоколов А.И. Суздальцев
05.18.01	Технология хлебопекарных, макаронных и кондитерских продуктов	С.Я. Корячкина
05.18.15	Товароведение пищевых продуктов	Т.Н. Иванова Е.Н. Артемова
05.23.01	Строительные конструкции, здания и сооружения	В.И. Коробко В.И. Колчунов В.М. Бондаренко
08.00.01	Экономическая теория	В.Ф. Бондарев В.Т. Смирнов
08.00.05	Экономика и управление народным хозяйством	В.П. Лукин С.А. Никитин О.А. Савина В.Г. Садков Л.А. Попова Л.В. Давыдова

## Диссертационные советы

по защите докторских и кандидатских диссертаций

<b>Д 212.182.01.</b>	
<b>05.11.13</b>	Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки).
<b>05.13.06</b>	Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность) (технические науки).
Председатель – доктор технических наук, профессор Ю.В. Колоколов (4862-41-98-79). Зам. председателя – доктор технических наук, профессор С.Ф. Корндорф (41-98-76). Ученый секретарь – доктор технических наук, профессор А.И. Суздальцев (41-98-79).	
<b>Д 212.182.02.</b>	
<b>08.00.05</b>	Экономика и управление народным хозяйством, в том числе: управление инновациями и инвестиционной деятельностью (экономические науки).
<b>08.00.05</b>	Экономика и управление народным хозяйством, в том числе: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами (промышленность) (экономические науки).
<b>08.00.05</b>	Экономика и управление народным хозяйством, в том числе: маркетинг (экономические науки).
Председатель – доктор экономических наук, профессор С.А. Никитин (4862-45-41-35). Зам. председателя – доктор экономических наук, профессор В.Ф. Бондарев (41-95-04). Ученый секретарь – доктор экономических наук, доцент С.А. Измалкова (45-41-35)	
<b>Д 212.182.03.</b>	
<b>01.02.04</b>	Механика деформируемого твердого тела (технические науки).
<b>01.02.06</b>	Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки).
<b>05.03.05</b>	Технологии и машины обработки давлением (технические науки).
<b>05.05.04</b>	Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки).
Председатель – доктор технических наук, профессор В.А. Голенков (4862-42-00-24). Зам. председателя – доктор технических наук, профессор В.А. Гордон (41-98-48). Ученый секретарь – кандидат технических наук, доцент М.И. Борзенков (43-48-90).	
<b>Д 212.182.04.</b>	
<b>08.00.01</b>	Экономическая теория (экономические науки).
<b>08.00.10</b>	Финансы, денежное обращение и кредит (экономические науки)
<b>08.00.12</b>	Бухгалтерский учет, статистика (экономические науки).
Председатель – доктор экономических наук, профессор Л.В. Попова (4862-41-98-60); Зам. председателя – доктор экономических наук, профессор В.Т. Смирнов (41-95-04); Ученый секретарь – кандидат экономических наук, доцент И.А. Дрожжина (41-95-04).	
<b>ДМ 212.182.05.</b>	
<b>05.23.01</b>	Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки).
<b>05.23.17</b>	Строительная механика (технические науки).

<p>Председатель – доктор технических наук, профессор В.И. Колчунов (4862-73-43-49);  Зам. председателя – доктор технических наук, профессор А.В. Коробко (41-98-46);  Ученый секретарь – кандидат технических наук, доцент А.И. Никулин (73-43-65).</p>	
<b>Д 212.182.06.</b>	
<b>05.02.11</b>	Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки).
<b>05.03.01</b>	Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).
<b>05.02.08</b>	Технология машиностроения (технические науки).
<p>Председатель – доктор технических наук, профессор Ю.С. Степанов (4862-47-50-71);  Зам. председателя – доктор технических наук, профессор А.В. Киричек (54-15-03);  Ученый секретарь – кандидат технических наук, доцент Ю.В. Василенко (54-14-19).</p>	
<b>7. ДМ 212.182.07.</b>	
<b>05.05.04</b>	Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки).
<b>05.22.10</b>	Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки).
<p>Председатель – доктор технических наук, профессор В.А. Корчагин;  Зам. председателя – доктор технических наук, профессор А.Н. Новиков(4862-41-25-45);  Зам. председателя – доктор технических наук, профессор Л.С. Ушаков (73-43-51, 41-98-85);  Ученый секретарь – кандидат технических наук, доцент А.Л. Севостьянов (76-29-94)</p>	
<p>Адрес: 302020 Россия г.Орел, Наугорское шоссе, 29  Каб. № 222, 223  Тел./факс: (4862) 41-91-18  E-mail: <a href="mailto:upk@ostu.ru">upk@ostu.ru</a></p>	

## Уважаемые коллеги!

В Орловском государственном техническом университете с 2004 г. издается научный журнал «Известия ОрелГТУ». Серия «Строительство. Транспорт», в котором Вы можете опубликовать свои статьи по широкому спектру проблем в следующих областях:

### Строительство

- эффективные архитектурно-конструктивные решения зданий и сооружений;
- энергосберегающие технологии в строительном комплексе;
- развитие теории расчета сооружений и элементов строительных конструкций, оснований и фундаментов;
- вопросы безопасности зданий и сооружений.
- строительные технологии, материалы и изделия;
- теория архитектуры и градостроительства;
- архитектурно-строительное проектирование;
- синтез искусств в архитектуре и др.

### Транспорт

- современные технологии и технологическое оборудование, используемые для технического обслуживания, ремонта автомобилей и реновации их деталей;
- системный анализ, управление и обработка информации в транспортном комплексе;
- повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта;
- проблемы качества энерго- и ресурсосбережения на автомобильном транспорте;
- экологическая безопасность транспортного комплекса.

Журнал открыт для рекламы, оплата – на договорной основе.

Объем статьи, как правило, не должен превышать 7 стр., рекламного объявления – не более 1 стр. Материал принимается в файловом виде: по электронной почте, на дискетах 3,5 дюйма или на CD-диске, выполненный в любом из текстовых редакторов Word, с приложением распечатки. С аспирантов плата за публикацию не взимается.

### ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц (заполнение последней страницы – не менее 75 процентов; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию. Объем рекламного объявления не должен превышать 1 страницу.
- 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.
- Статьи должны быть набраны 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.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственным стандартам.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

#### ПОСТРОЕНИЕ СТАТЬИ

- УДК (сверху слева) с абзацным отступом.
- С пропуском одной строки – выровненные по центру страницы и набранные прописными буквами светлым шрифтом прямого начертания инициалы и фамилии авторов (ИВАНОВ И.И.).
- С пропуском одной строки – название статьи, набранное без абзацного отступа прописными буквами полужирным шрифтом 14 pt и расположенное по центру страницы.
- С пропуском одной строки – краткая (не более 10 строк) аннотация, набранная с абзацного отступа курсивным шрифтом 10 pt на русском языке.
- Краткая (не более 10 строк) аннотация, набранная с абзацного отступа курсивным шрифтом 10 pt на английском языке, отделенная от предыдущей аннотации одинарным интервалом.
- Основной текст статьи. Заголовки подразделов набирают с абзацным отступом полужирным шрифтом прописными буквами (размер 12 pt), выравнивание по левому краю. Заголовки и подзаголовки отделяют от основного текста одинарным интервалом сверху.

---

#### Пример оформления

УДК 539.4:620.179

МАЛИНИН В.Г., МАЛИНИН В.В.

### **ДВУХУРОВНЕВЫЙ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ГРАДИЕНТНЫЙ КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ**

*На основе системного подхода структурно-аналитической мезомеханики формулируется двухуровневый структурно-механический, градиентный критерий разрушения, позволяющий развить методики оценки параметров трещиностойкости и учитывающий влияние зон структурных концентраторов на прочность в окрестности макроконцентратора напряжений.*

**Ключевые слова:** критерий разрушения, напряжения, прочность.

*On the basis of the system approach structural - analytical mezo mechanics it is formed two-level structural - mechanical gradiental criterion of the destruction, allowing to develop techniques of an estimation of parameters crack of resistance and taking into account influence of zones of structural concentrators on durability in a vicinity of the macroconcentrator of stresses.*

**Key words:** criterion of destruction, a pressure, durability.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Прочностное состояние нагруженного твердого тела находится между хрупким и вязким, различие между которыми в механическом аспекте зависит от вида напряженно-деформированного состояния, истории нагружения, эволюции дефектной структуры и определяется соотношением энергетических затрат на обратимые и необратимые явления деформирования. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения прочностного состояния материала в изделиях с макроконцентраторами с учетом влияния структурного состояния на микро- и мезомасштабном уровнях и влияния неоднородности макронапряженного состояния на локальные механические характеристики материала. Поставленную задачу можно решать в рамках градиентного подхода оценки локальной прочности в зоне концентрации напряжений, рассматривая состояние материала по двум критериям с непрерывным переходом из одного в другой.

## Таблицы, рисунки, формулы

• Все таблицы, рисунки и основные формулы, приведенные в тексте статьи, должны быть пронумерованы.

• Формулы следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 с размерами: обычный шрифт – 12 pt, крупный индекс – 10 pt, мелкий индекс – 8 pt. Формулы, внедренные как изображение, не допускаются! Русские и греческие буквы, а также обозначения тригонометрических функций, набираются прямым шрифтом, латинские буквы – *курсивом*.

• Формулы выравнивают по левому краю страницы с абзацным отступом и нумеруют (только те, на которые приводят ссылки); порядковый номер формулы обозначается арабскими цифрами в круглых скобках около правого поля страницы.

• В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими государственными стандартами. Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

• Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют.

### Пример оформления формулы в тексте

$$q_1 = (\alpha - 1)^2 \left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right) / d, \quad (11)$$

где  $\alpha = 1 + 2a/b$  – коэффициент концентрации напряжений;  $d=2a$  – размер эллиптического отверстия вдоль опасного сечения.

---

• Рисунки и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.

• Если рисунок небольшого размера, желательно его обтекание текстом.

• Подписи к рисункам выравнивают по ширине страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

• Пояснительные данные набираются шрифтом прямого начертания 12 pt и ставят после наименования рисунка.

### Пример оформления рисунка в тексте

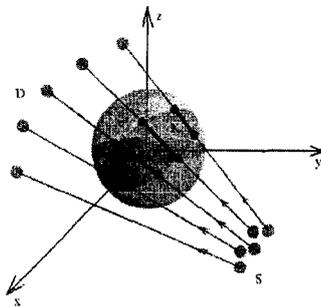


Рисунок 1 – Схема сканирования объекта:  $S$  – множество источников;  $D$  – множество детекторов;  $K$  – множество элементарных объемов тела, через которые прошел луч

---

• На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте, при ссылке следует писать слово «таблица» с указанием ее номера.

- Заголовки граф и строк таблицы пишутся с прописной буквы, а подзаголовки – со строчной, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставятся. Текст внутри таблицы в зависимости от объема размещаемого материала может быть набран шрифтом меньшего кегля, но не менее 8 pt. Текст в столбцах располагают от левого края либо центрируют.

- Слово «Таблица» размещается по левому краю, после него через тире располагается название таблицы:

Таблица 1 – Текст названия

- Если в конце страницы таблица прерывается и ее продолжение будет на следующей странице, нижнюю горизонтальную линию в первой части таблицы не проводят. При переносе части таблицы на другую страницу над ней пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы: «Продолжение таблицы 1».

- Нумерация граф таблицы арабскими цифрами необходима только в тех случаях, когда в тексте документа имеются ссылки на них, при делении таблицы на части, а также при переносе части таблицы на следующую страницу.

### Примеры оформления таблиц в тексте

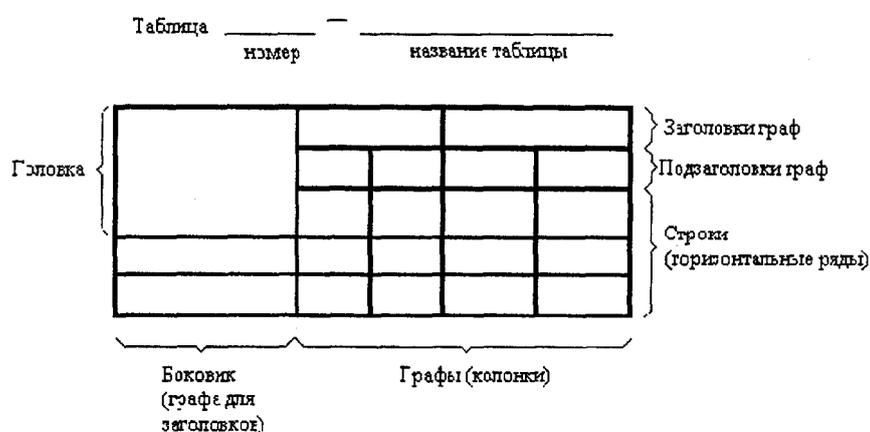


Таблица 1 – Название

Номинальный диаметр резьбы болта, винта, шпильки	Внутренний диаметр шайбы	Толщина шайбы					
		легкой		нормальной		тяжелой	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
2,0	2,1	0,5	0,8	0,5	0,5	-	-

### Список литературы

- Список литературы, набранный обычным шрифтом прямого начертания 12 pt, помещается в конце статьи. Заголовок «ЛИТЕРАТУРА» набирается обычным шрифтом 12 pt прописными буквами с выравниванием по центру без абзачного отступа. Литературные ссылки оформляются по ГОСТ 7.1 2003.

## Пример оформления списка литературы

### ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 271 с.

#### Сведения об авторах

• В конце статьи приводятся набранные 10 pt сведения об авторах в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество (полужирный шрифт); учреждение или организация, ученая степень, звание, должность, адрес, телефон, электронная почта (обычный шрифт).

#### Пример оформления сведений об авторах

##### **Константинов И.С.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Информационные системы», профессор  
Тел.: +7 (4862) 40-96-14  
E-mail: konstantinov@ostu.ru

##### **Бизин И.В.**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Ассистент кафедры «Информационные системы»  
Тел.: +7 (4862) 43-26-19  
E-mail: bizin@yandex.ru

*Адрес учредителя:*  
Орловский государственный технический университет  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
+7 (4862) 73-43-48  
www.ostu.ru  
E-mail: oantc@ostu.ru

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

Подписано в печать 15.12.2009 г.  
Формат 70x108 1/16. Печ. л. 6,56.  
Тираж 300 экз.  
Заказ № 03/10.11

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.