

ВЕСТНИК  
ТГАСУ

ISSN 1607-1859



Подписной индекс 20424  
в Объединенном Каталоге «Пресса России»

ВЕСТНИК ТГАСУ № 1 2014

**ВЕСТНИК**

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

**1**  
**2014**



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Л.С. Ляхович, докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, гл. редактор;  
А.Н. Овсянников, канд. техн. наук, доцент, зам. гл. редактора;  
Г.Г. Семухина, отв. секретарь редколлегии;  
В.Г. Ананин, докт. техн. наук, профессор;  
Г.Г. Волокитин, докт. техн. наук, профессор;  
А.И. Гныря, докт. техн. наук, профессор, советник РААСН;  
В.В. Дзубо, докт. техн. наук, профессор;  
Г.В. Есаулов, докт. архит., профессор, академик РААСН, гл. ученый секретарь РААСН;  
В.Н. Ефименко, докт. техн. наук, профессор;  
В.Г. Залесов, канд. архит., доцент;  
В.А. Ильичев, 1-й вице-президент РААСН, докт. техн. наук, профессор, академик РААСН;  
В.И. Коренев, канд. архит., доцент, советник РААСН;  
О.Г. Кумпяк, докт. техн. наук, профессор, советник РААСН;  
А.И. Кудяков, докт. техн. наук, профессор, советник РААСН;  
А.П. Малиновский, канд. техн. наук, доцент;  
О.И. Недавний, докт. техн. наук, профессор;  
В.Е. Ольховатенко, докт. техн. наук, профессор, советник РААСН;  
С.Н. Овсянников, докт. техн. наук, профессор;  
О.В. Стахеев, канд. архит., доцент;  
В.И. Травуш, вице-президент РААСН, докт. техн. наук, профессор, академик РААСН;  
Н.А. Цветков, докт. техн. наук, профессор;  
Е.М. Чернышов, председатель президиума Центрального отделения РААСН, докт. техн. наук, профессор, академик РААСН;  
В.К. Шилько, докт. техн. наук, профессор;  
С.В. Ющубе, канд. техн. наук, доцент.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайте «Научная электронная библиотека»: <http://www.elibrary.ru>, а также на сайте ТГАСУ: <http://www.tsuab.ru>

Научное издание  
ВЕСТНИК ТГАСУ № 1 – 2014  
ISSN 1607-1859

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.

---

Редакторы Т.С. Володина, Е.А. Кулешова. Корректор Е.Ю. Глотова.  
Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.  
Технический редактор А.В. Володина.  
Подписано в печать 19.02.2014. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.  
Уч.-изд. л. 16,50. Усл. печ. л. 19,6. Тираж 500 экз.  
Зак. № 46.

---

Адрес редакции: 634003, Томск-3, пл. Соляная, 2, тел. 65-37-61, e-mail: [vestnik\\_tgasu@tsuab.ru](mailto:vestnik_tgasu@tsuab.ru)  
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск-3, ул. Партизанская, 15

© Томский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2013

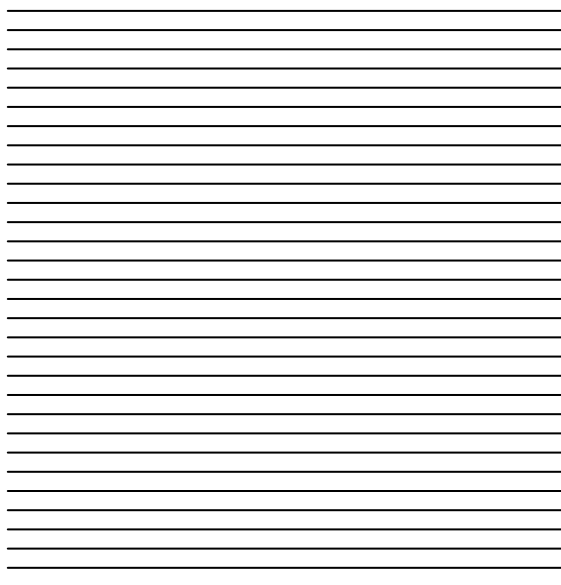
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Tomsk State University of Architecture and Building

**V E S T N I K**  
OF TOMSK STATE UNIVERSITY  
OF ARCHITECTURE AND BUILDING

№ 1 (42) 2014  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999



## EDITORIAL STAFF

1. L.S. Lyakhovich, DSc, Professor, RAACS Academician, Chief Editor
2. A.N. Ovsyannikov, Ph.D., A/Professor, Deputy Chief Editor
3. G.G. Semukhina, Editorial Staff Secretary
4. V.G. Ananin, DSc, Professor
5. G.G. Volokitin, DSc, Professor
6. A.I. Gnyrya, DSc, Professor, RAACS Adviser
7. V.V. Dzyubo, DSc, Professor
8. G.V. Esaulov, DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Principal Scientific Secretary
9. V.N. Efimenko, DSc, Professor
10. V.G. Zalesov, Ph.D., A/Professor
11. V.A. Iljichev, DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS First Vice President
12. V.I. Korenev, Ph.D., A/Professor, RAACS Adviser
13. O.G. Kumpyak, DSc, Professor; RAACS Adviser
14. A.I. Kudyakov, DSc, Professor; RAACS Adviser
15. A.P. Malinovskiy, PhD, A/Professor
16. O.I. Nedavniy, DSc, Professor
17. V.E. Olkhovatenko, DSc, Professor; RAACS Adviser
18. S.N. Ovsyannikov, DSc, Professor
19. O.V. Stakheev, PhD, A/Professor
20. V.I. Travush, DSc, Professor, RAACS Vice President
21. N.A. Tsvetkov, DSc, Professor
22. E.M. Chernyshov, DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch
23. V.K. Shil'ko, DSc, Professor
24. S.V. Yushchube, PhD, A/Professor

## INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building» is included in the list of the peer reviewed scientific journals and editions published in the Russian Federation. The main results of PhD and DSc theses obtained in construction and architectural field studies should be published in this journal. The journal was approved by the decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science.

Decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia,  
17 June, 2011

The electronic version of the journal is available at <http://www.elibrary.ru>

Scientific Edition  
VESTNIK of TSUAB № 1 – 2014  
ISSN 1607-1859

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.

---

Editors: T.S. Volodina, E.A. Kuleshova, E.Yu. Glotova

Translator: M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash

Technical editor: A.V. Volodina

Passed for printing: 19.02.2017. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman

Published sheets: 16,50. Conventional printed sheets: 19,6. Print run: 500 copies

Order N 46

---

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk

Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: [vestnik\\_tgasu@tsuab.ru](mailto:vestnik_tgasu@tsuab.ru)

TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003

© Tomsk State University  
of Architecture  
and Building, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<b>Поляков Е.Н., Иноземцева Т.О.</b> Древнегреческий театр – история зарождения (ТГАСУ, г. Томск).....	9
<b>Меерович М.Г.</b> Расселение в СССР в начальный период индустриализации (ИГТУ, г. Иркутск) .....	31
<b>Молчанов В.М., Благова М.В.</b> Социально-архитектурная типология современного коммерческого жилища в России (ААиИ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону) .....	38
<b>Поганов А.Е.</b> Историческая периодизация развития общественных пространств многоцелевого использования (ПГАСиА, г. Днепропетровск).....	47
<b>Овчаров А.Т.</b> Светодиодная светотехника в наружном освещении г. Томска (ТГАСУ, г. Томск) .....	55

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

<b>Украинченко Д.А., Жаданов В.И., Калинин С.В.</b> Численные исследования плит покрытия и панелей стен с клеодощатой обшивкой (ОГУ, г. Оренбург).....	68
--	----

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

<b>Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В.</b> Исследование процессов, протекающих при плазмохимическом синтезе высокотемпературных силикатных расплавов. Часть 2: анализ продуктов плавления отходов обогащения молибденовых руд (ТГАСУ, г. Томск).....	80
<b>Сафронов В.Н., Кугаевская С.А.</b> Оптимизация свойств цементных композитов при различных технологических приемах подготовки цикловой магнитной активации воды затворения (ТГАСУ, г. Томск).....	85
<b>Мананков А.В., Страхов Б.С.</b> Петрогеохимические исследования горного сырья Полярного Урала для производства петроситаллов (ТГАСУ, г. Томск).....	100
<b>Киселёва М.А., Наумова Л.Б., Скворцова Л.Н., Гаевая Л.Н.</b> Изучение возможности извлечения фенола и щавелевой кислоты из водных растворов природными сорбентами (ТГУ, г. Томск) .....	109

### ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

<b>Сколубович Ю.Л., Бойко О.А., Зеркаль С.М., Сколубович А.Ю., Рогазинский С.В.</b> Численные результаты моделирования работы фильтрующего взвешенного слоя (НГАСУ, ИВМиМГ, г. Новосибирск) .....	119
---	-----

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

<b>Ефименко С. В., Ефименко В.Н., Афиногенов А.О.</b> К уточнению схемы дорожно-климатического районирования территорий на примере районов Западной Сибири (ТГАСУ, г. Томск, ООО «Кузбасский центр дорожных исследований», г. Кемерово).....	125
<b>Сидоренко Н.Н., Бурлуцкий А.А.</b> Экономическое обоснование проектных решений при проектировании автомобильных дорог и транспортных сооружений с учетом изменения во времени себестоимости перевозок, стоимости ремонтных работ, заработной платы работающего населения (ТГАСУ, г. Томск).....	135

<b>Шумилов Б.М., Байгулов А.Н., Абдыкалык кызы Ж.</b> Алгоритм и программа вейвлет-моделирования поверхностей автомобильных дорог (ТГАСУ, г. Томск).....	142
<b>Кайминг Би (Kaiming Bi), Хонг Хао (Hong Hao).</b> Численное моделирование повреждений от соударения мостовых конструкций при пространственном изменении колебаний грунта (Университет Западной Австралии, Австралия).....	153

#### ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА

<b>Прокофьева Г.И., Гусакова Н.В.</b> Экономическое обоснование использования технологий энергосбережения в строительстве малоэтажной жилой и социальной инфраструктуры (ТГАСУ, г. Томск) .....	181
---	-----

#### СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

<b>Негодин А.В., Кравченко С.М., Осипов С.П.</b> Влияние гравийно-галечных включений в мерзлых грунтах на показатели процесса их резания острым инструментом (ТГАСУ, г. Томск).....	190
<b>Осипов С.П., Анпилогов П.В., Кравченко С.М., Негодин А.В.</b> Имитационно- эмпирическая модель временного распределения тягового усилия многолезцовых рабочих органов землеройных машин (ТГАСУ, г. Томск) .....	201

#### ВНЕ РУБРИКИ

<b>Бойко В.П., Бойко О.Е.</b> Выдающийся ученый С.П. Тимошенко и его вклад в развитие инженерно-строительного образования (ТГАСУ, ТГУ, г. Томск).....	211
--	-----

## C O N T E N T S

### ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

<b>Polyakov E.N., Inozemtseva T.O.</b> Ancient Greek Drama: History Of Formation (Tomsk) .....	9
<b>Meerovich M.G.</b> Settlement in the USSR at the Beginning of Industrialization (Irkutsk).....	31
<b>Molchanov V.M., Blagova M.V.</b> Social and Architectural Typology of Modern Commercial Housing in Russia (Rostov-on-Don).....	38
<b>Potapov A.E.</b> Historical Development of Multi-Purpose Public Space (Dnepropetrovsk, Ukraine).....	47
<b>Ovcharov A.T.</b> Light-Emitting Diode Street Lightning in Tomsk (Tomsk) .....	55

### BUILDING STRUCTURES

<b>Ukrainchenko D.A., Zhadanov V.I., Kalinin S.V.</b> Numerical Studies of Roof Slabs and Wall Panels Covered with Laminated Bars (Orenburg).....	68
--	----

### BUILDING MATERIALS

<b>Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Abzaev Yu.A., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V.</b> Study of Plasma-Chemical Synthesis of High-Temperature Silicate Melts (Part 2). Smelting of Tailings of Molybdenum Ores Beneficiation (Tomsk).....	80
<b>Safronov V.N., Kugaevskaya S.A.</b> Optimization of Properties of Cement Composites at Different Magnetic Activation Techniques of Mixing Water (Tomsk).....	85
<b>Manankov A.V., Strakhov B.S.</b> Petro-Geochemical Research of Polar Urals Rock Glass-Ceramics Production (Tomsk).....	100
<b>Kiseleva M.A., Naumova L.B., Skvortsova L.N., Gaevaya L.N.</b> A Possibility of Extracting Phenol and Oxalic Acid from Aqueous Solutions by Natural Sorbents(Tomsk) .....	109

### WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF PROTECTION OF WATER RESOURCES

<b>Skolubovich Yu.L., Boiko O.A., Zerkal' S.M., Skolubovich A.Yu., Rogazinskii S.V.</b> Numerical Simulation of Behavior of Filtering Bed Entrapping Suspended Impurities (Novosibirsk).....	119
--	-----

### DESIGNING AND ENGINEERING OF ROADS, METROPOLITAN RAILWAYS, AERODROMES, TUNNELS AND BRIDGES

<b>Efimenko S.V., Efimenko V.N., Afinogenov A.O.</b> The Outline of Road Building Climatic Zoning in Western Siberia (Tomsk, Kemerovo) .....	125
<b>Sidorenko N.N., Burlutskii A.A.</b> Economic Feasibility of Highway and Transport Facility Design Considerations (Tomsk).....	135
<b>Shumilov B.M., Baigulov A.N., Abdykalyk kyzy Zh.</b> Algorithm and Wavelet-Modeling Program for Road Pavements (Tomsk) .....	142

**Kaiming Bi, Hong Hao.** Numerical Simulation of Pounding Damage to Bridge Structures under Spatially Varying Ground Motions (Australia) ..... 153

CONSTRUCTION ECONOMICS

**Prokof'eva G.I., Guskova N.V.** Economic Feasibility for Energy Saving Technologies in Low-Rise and Social Infrastructure Construction (Tomsk) ..... 181

ROAD AND CONSTRUCTION MACHINES

**Negodin A.V., Kravchenko S.M., Osipov S.P.** The Impact of Gravel and Boulder Inclusions on Ice Soil Cutting Parameters (Tomsk)..... 190

**Osipov S.P., Anpilogov P.V., Kravchenko S.M., Negodin A.V.** Empirical Model Simulated for Moving Force Time Distribution of Multicut Operating Elements (Tomsk) ..... 201

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.032 + 7.032.7

*ПОЛЯКОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. архит., доцент,  
polyakov.en @ yandex.ru  
ИНОЗЕМЦЕВА ТАТЬЯНА ОЛЕГОВНА, студентка,  
polyakov.en @ yandex.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## ДРЕВНЕГРЕЧЕСКИЙ ТЕАТР – ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ

Статья посвящена истории становления древнегреческого театра – от проведения сельских праздников в честь бога Диониса до строительства первых в мировой истории монументальных зрелищных зданий. Рассмотрены вопросы организации древнейших театральных представлений – трагедии и комедии, особенности пространственного размещения их участников и зрителей. Затронута специфика профессиональной деятельности греческих актеров и хоревтов, их одеяний и масок. Сделан краткий обзор творчества драматургов Феспида, Эсхила, Софокла, Еврипида и др. На основе этого материала раскрыты особенности архитектуры, конструктивного решения и технического оснащения важнейших частей греческого театра – орхестры, сцены и театрона.

**Ключевые слова:** Древняя Греция; Дионисии; трагедии; комедии; античный театр; орхестра; сцена; театрон.

*EVGENII N. POLYAKOV, PhD, A/Professor,  
polyakov.en@yandex.ru  
TAT'YANA O. INOZEMTSEVA, Student,  
polyakov.en@yandex.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## ANCIENT GREEK DRAMA: HISTORY OF FORMATION

The article is devoted to the history of Ancient Greek Drama from rural holidays in honour of Dionysos till the first in world history monumental theatre buildings. The problems of antique theatre performances (tragedies and comedies) and spatial accommodation of actors and spectators are considered in this paper. Professional activity of Greek actors and choreuts, their garments and masks is described herein. The paper presents creativity of Thespis, Eschylus, Sophocles, Euripides, and others. Specific architecture, design, and engineering equipment of the most important parts of the Ancient Greek Drama are shown (orchestra, scene and theatron).

**Keywords:** Ancient Greece; Dionysus; tragedy; comedy; antique theatre; orchestra; scene; theatron.

Настоящая работа является логическим продолжением цикла статей, посвященных архитектуре зрелищных зданий античных государств. В первой статье этого цикла [1] была рассмотрена история становления архитектуры древнеримских театров – от временных подмостков, уничтожаемых по окончании праздника, до стационарных каменных театров времен поздней Римской республики. Там же была подробно рассмотрена функциональная структура римского театра, показаны его принципиальные отличия от древнегреческого и сделан краткий обзор наиболее знаменитых театров Римской республики, построенных в I в. до н. э. – Марка Эмилия Савра, Гнея Помпея Великого и Луция Корнелия Бальба. В статье была высказана мысль о том, что первые каменные театры Рима строились по образцу театров Древней Греции классической и эллинистической эпох: «Знаменитый римский полководец Гней Помпей (106–48 гг. до н. э.), восхищенный прекрасным греческим театром в Митилене, начал строительство в Риме первого каменного театра... Вид митиленского театра привел Помпея в восторг, и он приказал снять план его с целью выстроить такой же театр в Риме...» [1, с. 17]. В заключении статьи была также кратко изложена концептуальная программа «нового театра» императора Августа, реализованная в 11 г. до н. э.

Театр, названный в честь Марка Клавдия Марцелла, был возведен Августом на Марсовом поле, по соседству с театрами Бальба и Помпея. Вторая статья [2] была посвящена архитектурно-композиционным особенностям этого театра и его декоративным украшениям. Автор попытался также обозначить роль этого уникального здания в культурно-просветительской политике первого римского императора, очень высоко ценившего древнегреческий жанр трагедии и стремившегося показывать на сцене своего «нового театра» произведения самых знаменитых римских и греческих драматургов. По этой причине театр Марцелла был выстроен в лучших античных традициях, истоки которых следует искать в архитектуре Древней Греции. Поэтому третью статью мы посвятили истории зарождения древнегреческого театра, особенностям его композиционного и конструктивного решений.

Древнегреческий театр (*греч.* θέατρον – «место для зрелищ, зрелище») – одна из древнейших разновидностей зрелищных зданий на территории Европы. Он достиг своего расцвета в V в. до н. э. Значение античного театра выходит далеко за хронологические рамки породившего его общества. Когда в XVI в. на сценах западноевропейских театров возродились жанры трагедии и комедии, образцами для них послужили произведения античных драматургов.

Появление драматических представлений и самого первого театра в Древней Греции неразрывно связано с земледельческими праздниками, посвященными ежегодным циклам умирания и возрождения природы, оплодотворению земли и сбору урожая. Эти праздники сопровождалась обрядовыми играми и хороводами в честь богинь-покровительниц земледелия – Деметры и ее дочери Коры (Персефоны), а также бога Диониса. По мнению Н.И. Брунова, «греческое театральное здание в своих истоках связано с культовыми

плясками на круглой площадке вокруг алтаря, которую окружало кольцо зрителей...» [3, с. 149]. Подобные обряды порою перерастали в культовую драму. Например, в Элевсине во время знаменитых мистерий (таинств, в которых участвовали лишь посвященные) устраивались зрелища, во время которых изображалось бракосочетание Зевса и Деметры, похищение Персефоны Аидом, переживания Деметры и возвращение Керы на землю [4].

На праздниках пробы молодого вина, устраиваемых в честь бога Диониса (Дионисиях), разыгрывали сценки из его жизни – о том, как Дионис доставил в Грецию виноградную лозу. Там же рассказывалось о его борьбе с врагами, гибели, воскрешении и окончательной победе над силами зла. Изображалось торжественное прибытие Диониса из-за моря на увитом плющом корабле, который римляне впоследствии назвали «корабельной повозкой» (*рим. carusnavalis*). Видимо, отсюда и произошло слово «карнавал» (*фр. carnaval, ит. carnevale*) (рис. 1).



Рис. 1. Изображения Диониса в античном искусстве

Вначале Дионис (рим. Вакх) считался богом производительной силы природы, и его порой изображали в облике козла или быка. Однако позже, когда древние греки занялись возделыванием виноградников, Дионис сначала стал богом виноделия, а затем уже и покровителем поэзии и театра (рис. 2).

Несколько раз в году устраивались празднества, на которых в его честь пели дифирамбы (хвалебные песни). На этих празднествах выступали ряженные («сатиры» и «силены»), составлявшие свиту Диониса. Участники шествия мазали лица винной гущей, надевали маски и козлиные шкуры с конскими хвостами.

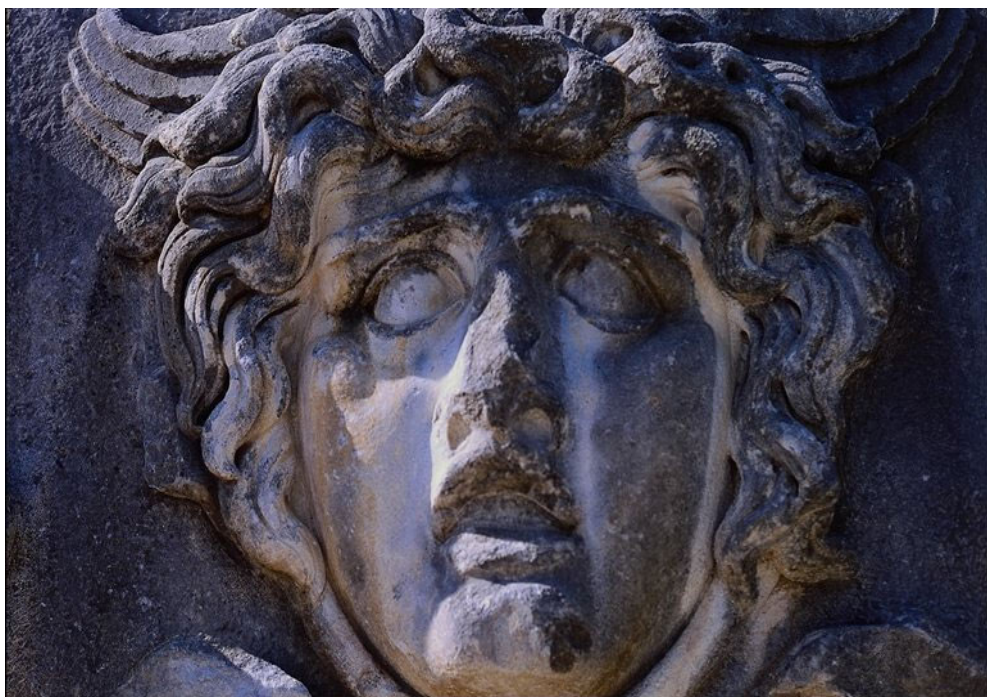


Рис. 2. Маскарон, изображающий Диониса

Кроме торжественных и печальных, они пели веселые, а порой и откровенно непристойные песни. Торжественная часть праздника легла в основу жанра трагедии, а веселая и шуточная – комедии. Последняя, по мнению Аристотеля, ведет свое начало от фаллических песен, в которых прославлялись производительные силы природы и людей. Запевалы (солисты) рассказывали зрителям о жизни богов и побуждали хор к пению. К повествованию примешивались элементы актерской игры, поэтому античный миф как бы оживал на глазах участников праздника. Вот что об этом пишет в своем сочинении «О музыке» древнегреческий философ-моралист Плутарх из Херонеи (45–127 гг. н. э.): «В еще более древние времена греки, как говорят, были совершенно незнакомы с театральной музыкой; музыка у них была всецело приурочена к богопочитанию и воспитанию юношества, тем более, что театральных сооружений люди той эпохи вовсе не знали; музыка у них еще не выходила за пределы святилищ, в которых с помощью ее они воздавали почитание божеству и хвалу доблестным мужам. Вероятно, что более позднее слово «театр» и гораздо более древнее *theorein* (присутствовать на торжестве) происходит от слова *theos* (бог)...» (27, 1) [5, с. 80].

Слово «трагедия» произошло от двух греческих слов: *трагос* – «козел» и *оде* – «песня» (т. е. «песня козлов»). Нельзя забывать, что спутниками Диониса были козлоногие сатиры, прославлявшие его подвиги и страдания.

В процессе развития греческой трагедии в ее репертуар, помимо сказаний о Дионисе, вошли сюжеты из жизни мифологических героев – Эдипа, Геракла, Агамемнона, Тесея. Это объясняется широкой популярностью мифологических

сказаний не только в аристократической среде, но и у простого народа, а также их неподражаемой образностью и художественной выразительностью. В каждой пьесе зритель встречал знакомых ему героев и мог с интересом наблюдать, как творческая фантазия драматурга на свой лад интерпретировала общеизвестный мифологический сюжет. То есть внимание зрителя сосредоточивалось не на сюжете пьесы, а на общественной и нравственной проблематике, которая разворачивалась вокруг того или иного мифа.

Как известно, древнегреческая мифология по-своему трактовала устройство и движущие силы природы и современного общества. Она была тесно связана не только с античной религией, но и с историей, философией, политикой, наукой. Каждый драматург по-своему интерпретировал реальные исторические события и бытовые сюжеты, открыто излагал свои этические, философские и религиозные взгляды. Мифологическая канва делала трагедию более доходчивой и доступной неискушенному зрителю.

Слово «комедия» также происходит от двух греческих слов: *комос* и *оде* (песня). Слово «комос» означает шествие группы пьяных бражников, осыпавших друг друга и зрителей веселыми шутками на празднике Диониса. То есть комедия равноценна «песне комоса». Во время праздника нередко разыгрывались сценки бытового и пародийно-сатирического содержания. Они назывались *мимами* (греч. подражание). Героями мимов обычно были персонажи народного балаганного театра: горе-воин, базарный воришка, ученый-шарлатан, простак, дурачащий всех, и др. Песни комоса и мимы – основные истоки древней аттической комедии.

В любой комедии, как и в трагедии, к религиозным и мифологическим мотивам всегда примешивались чисто житейские, которые постепенно стали преобладающими или даже единственными. Хотя в целом комедия по-прежнему считалась посвященной Дионису. Однако к шуткам, песням и небольшим сценкам уже в то время примешивались элементы социальной сатиры. В V в. до н. э. комедия стала политической по своему содержанию. Она затрагивала проблемы государственного устройства, деятельности отдельных учреждений Афинской республики, ее внешней политики, войны и мира. Нельзя забывать, что жанр комедии формировался в условиях афинской рабовладельческой демократии.

### Древнегреческие драматурги

По свидетельству очевидцев, жанр трагедии уже во второй половине VI в. до н. э. достиг своего апогея, впитав богатейшее наследие народного эпоса и фольклорной лирики. Этому во многом способствовали нововведения драматурга Феспида, уроженца Икарии.

**Феспид** (VI в. до н. э.) был первым трагическим поэтом в Афинах. Его первая трагедия была поставлена весной 534 г. до н. э. на празднике Великих Дионисий. Именно этот год принято считать датой рождения мирового театра.

Феспид впервые занялся изготовлением специального актерского снаряжения – масок, театральных костюмов. Но важнейшим его нововведением стало выделение из хора одного актера-декламатора. В этой роли нередко выступал сам Феспид. Декламатор (греч. *гипокрит* – «ответчик») по ходу пьесы

обращался к хору с вопросами и отвечал на вопросы хоревтов. Он также играл роли различных персонажей пьесы, периодически покидал оркестру (сценическую площадку) и вновь возвращался на нее. Таким образом, ранняя греческая трагедия стала живым диалогом между гипокритом и хором и по форме напоминала *лирическую кантату*. Хотя в процентном соотношении партия актера в ранних драмах была невелика и основная роль отводилась хору, именно гипокрит стал главным действующим лицом в спектакле.

Ученик Феспиды **Фриних** (ок. 540 – ок. 470 г. до н. э.) расширил сюжетные рамки трагедии, выведя ее за пределы мифов дионисийского круга. Он написал серию трагедий на исторические сюжеты (например, «Взятие Милета», ок. 492 г. до н. э.). В этом произведении изображались эпизоды захвата и разграбления персами города Милета, восставшего вместе с другими греческими городами против персидского владычества (494 г. до н. э.). Своей игрой Фриних настолько потряс зрителей, что его пьеса была надолго запрещена, а самого автора приговорили к крупному денежному штрафу.

До наших дней дошли лишь небольшие фрагменты произведений Феспиды и Фриниха. Сведения об их театральной деятельности также очень скудны. Однако совершенно ясно, что первые античные драматурги очень живо реагировали на актуальные вопросы современности и сделали театр местом обсуждения важнейших проблем политической и общественной жизни, а также трибуной, оказавшей существенное влияние на формирование демократических принципов Афинского государства.

Расцвет греческого театрального искусства связан с деятельностью великих драматургов VI–V вв. до н. э. – Эсхила, Софокла и Еврипида, а также комедиографа Аристофана. Были и иные авторы, однако известны лишь их имена да отдельные фрагменты произведений.

**Эсхил (525–456 гг. до н. э.)**. Творчество Эсхила было связано с начальным этапом становления Афинского демократического государства. В трагедиях, созданных до него, было очень мало действия. Эсхил обычно писал героико-патриотические произведения, в которых рассматривались наиболее актуальные исторические и религиозно-философские темы. Он ввел в спектакль второго актера. Этим была открыта возможность более глубокой разработки трагического конфликта и усиления действенной стороны театрального представления. Появление второго актера привело к становлению актерского диалога, которого не было раньше.

При Эсхиле определилась классическая форма трагедии и сценарий ее постановки. Почти все его пьесы начинались с пролога. За ним следовал *парод* (песня хора), а затем уже – чередование *эписодиев* (диалогов хора и актеров) и *стасимов* (песен хора). Обычно трагедия состояла из 3–4 эписодиев и 3–4 стасимов. Стасимы разбивались на отдельные части – *строфы* и *антистрофы*. При их исполнении хор двигался по периметру оркестры то в одну, то в другую сторону. Хоровое пение обязательно сопровождалось аккомпанементом флейты и нередко танцами (*эммелейями*). Завершалась трагедия *экседом* – песней, с которой хор покидал оркестру.

Эсхил был главным исполнителем в своих трагедиях. От актеров он требовал высокого мастерства. Хор, состоявший из 12 человек, играл у него

ведущую роль. Партии хора по времени занимали более половины его пьес. Кроме того, многие постановки Эсхила включали в себя элементы помпезности и мистики (торжественные въезды на колесницах, праздничные процессии, появление призраков и прочее).

Более подробно о техническом оснащении пьес Эсхила говорится в десяти томной лексической энциклопедии «Ономастикон», написанной Юлием Поллуксом (Полидевком) во второй половине II в. н. э.: «Применяется полукружие для показывания отдаленных от города местностей или лиц, плывущих по морю, подобно строфию, на котором являются обожествленные герои или лица, погибшие в море или на войне. По Хароновым лестницам, находящимся у входов на места для зрителей, выходили призраки. А подъемные машины находятся на сцене для появления речных божеств и других подобных им существ; они находятся около ступеней, по которым всходят Эринии...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 132) [5, с. 74]. К выдержкам из четвертого тома «Ономастикона» (точнее, раздела «Танцы, театр») в этой статье мы прибегнем неоднократно.

**Софокл (496–406 гг. до н. э.).** С окончанием греко-персидских войн последовал стремительный политический и культурный подъем Афин. Он обусловил новый этап в развитии древнегреческого искусства. Творчество Софокла отобразило эти события на сцене театра. Если у Эсхила боги, хотя бы и невидимые, выступают на первом плане, то в трагедиях Софокла основное внимание уделено смертному человеку, его душевным переживаниям, мыслям и страстям. Созданные Софоклом образы (Эдип, Антигона, Электра и др.) глубоко человечны. Конфликт трагедий Софокла – в драматическом противоборстве человека с неотвратимостью судьбы, рока. В его трагедиях отражены гражданские и нравственные идеалы античной рабовладельческой демократии эпохи расцвета. Высокая гуманистическая направленность творчества Софокла, интерес к человеческой личности и ее душевным переживаниям повлекли за собой дальнейшую драматизацию театрального представления. На сцене появился третий актер. Одновременно с этим уменьшилась роль хора (несмотря на доведение числа хороводов до 15). Основное внимание было уделено диалогам, индивидуальной игре актеров. С именем Софокла также связано появление живописных декораций: «Декорациями были картины на ткани или на досках, применительно к содержанию пьесы; они навешивались на периакты, изображая море, реку и тому подобное. Полукружие названо так по своему виду, а помещается оно возле оркестры...» [Поллукс, Ономастикон, IV, 131] [5, с. 74].

Все эти нововведения сделали трагедию более живой и органичной. Этому способствовало также разыгрывание на сцене более сложных, чем у Эсхила, жизненных коллизий – переходов от счастья к несчастью и обратно. Софокл полностью отказался от сценических эффектов, которыми пользовался Эсхил. У него уже нет торжественных выездов царей на колесницах, не появляются призраки и т. п.

**Еврипид (485–406 гг. до н. э.).** В творчестве Еврипида нашли отражение рост общественных противоречий в период Пелопоннесской войны и начавшийся кризис полисной системы. В его трагедиях звучание героиче-

ской темы снижается, но при этом усиливается внимание к внутреннему миру человека и к явлениям окружающего мира. Соответственно этому изменился характер декораций: «Башенка (scorē) сделана для часовых или для иных наблюдателей; да и стена и башня предназначены как бы для смотрения сверху. А назначение сторожки (phryktōrion) ясно из самого ее названия. Дистегия же – иногда надстройка на царском дворце, вроде той, откуда Антигона в «Финикиянках» [трагедии Еврипида] смотрит на войско, а иногда – черепичная крыша, откуда бросаются черепицами... В комедии же с дистегии подглядывают сводники, либо смотрят вниз старушонки или женки...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 129–130) [5, с. 74].

Миф становится для Еврипида только исходным материалом или основой произведения, дающей возможность высказаться его современникам. Обострение драматических конфликтов и умение найти в каждой критической ситуации наиболее острые моменты в соединении с изображением душевных переживаний героев делают Еврипида наиболее трагичным из всех античных драматургов. В целях эмоционального воздействия на зрителей и усиления зрелищной стороны трагедии Еврипид вводит в свои драмы сцены смерти, физических страданий, безумия. Он первым широко использует в своих представлениях сценические машины: «Кроме того, к театру относятся: экиклема, эксостра, башенка, стена, башня, сторожка, дистегия, приспособление для молний (keraunoskopeion), приспособление для грома (bronteion), помост для богов (theologeion), журавель, летательные канаты (aiōrai), декорации (katablēmata), полукружие (hēmikyklion), строфий, полустрофий, Хароновы лестницы и подъемные машины (anapiesmata)...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 127) [Там же].

Еврипид также применил в своих трагедиях *монодии*, в которых душевные переживания героев раскрывались выразительными средствами не только слова, но и музыки. Хор в его драмах уже не имеет такой тесной связи с развитием сюжета, как у Софокла.

**Аристофан (ок. 446 – ок. 385 гг. до н. э.).** Античная комедия, политическая по своему содержанию, достигла наивысшего расцвета в творчестве Аристофана. В период интенсивного нарастания социальных противоречий внутри афинского общества комедиограф выступил страстным защитником демократии и выразителем дум и чаяний крестьянства. Аристофан превратил театр в средство борьбы за общественные идеалы. В своих произведениях он вывел множество ярких социальных типов – бесчестного демагога, обманывающего народ и расхищающего государственную казну, философа-софиста, развращающего своим учением молодых людей, и другие не менее выразительные образы. Положительным героем в комедиях Аристофана обычно выступает мелкий собственник, обрабатывающий землю с помощью одного-двух рабов.

Комедии Аристофана создали живой, сценически выразительный тип представления, богатый острыми диалогами и насыщенный буффонадой. Все это требовало от постановщика и актеров изобразительности, яркости игры, смелых и остроумных мизансцен.

## Организация театральных представлений

Театр в Древней Греции всегда находился в ведении государства. Представления ставились – Малых («сельских») Дионисиях (декабрь – январь), Ленеях (январь – февраль) и Великих («городских») Дионисиях (март – апрель).

На этих праздниках устраивались *агоны* (*агонии*) – состязания драматургов. В конкурсе обычно участвовали три трагических и три комических поэта. Каждый трагик должен был представить на конкурс *трилогию* (три трагедии, связанные единым сюжетом) и одну сатирическую драму (пьесу на мифологический сюжет с хором, состоящим из «сатиров»). Трилогия и сатирическая драма составляли *тетraloгию*. Состязания продолжались три дня. Каждый день с утра разыгрывали тетралогию, а под вечер – произведение одного из участвовавших в состязании комических поэтов. Всего – пять произведений в день. К участию в состязаниях допускались только новые, оригинальные произведения; игравшиеся ранее шли вне конкурса.

Драматурги получали хор от *архонта* (высшее должностное лицо Афин). Вначале они сами писали музыку и занимались обучением хороводов, но затем им пришлось прибегнуть к помощи профессиональных учителей. Все финансовые издержки, связанные с подготовкой и обучением хора, брал на себя богатый покровитель искусства – *хорег*. Он же оплачивал весь театральный реквизит. Всего для организации драматических состязаний требовалось шесть хорегов (три – для тетралогий, три – для комедий). Обязанность хорего была почетной, поскольку считалось, что он находится под особым покровительством Диониса. В период подготовки к праздникам участники хора освобождались от несения государственной и военной службы. Хорег, который подготовил хор, победивший на состязаниях, имел право воздвигнуть в честь этой победы памятник. На нем писали дату состязания, имя победившего драматурга, название пьесы и, конечно же, имя хорего. Результаты состязаний фиксировались в особом протоколе (*дидаксикалии*), хранившемся в государственном архиве Афин.

Судили на состязаниях выборные лица. Для драматургов были установлены три награды. Автор постановки, занявшей третье место, считался потерпевшим поражение. Зато победитель помимо гонорара получал в награду венок из священного плюща. Эсхил в состязаниях драматургов побеждал 13 раз, Софокл – 24. Еврипид получил всего лишь пять первых наград, причем последний венок был присужден ему посмертно.

## Актеры и маски

Как известно, Феспид в своих трагедиях был единственным актером (*протагонистом*). Его партия сопровождалась пением хора. Эсхил ввел *девторониста* (второго актера), а Софокл, младший современник Эсхила, – *тритагониста* (третьего актера). Однако главные роли в драмах по-прежнему играл первый, наиболее талантливый актер (гипокрит, протагонист).

Благодаря тесной связи греческого театра с религией актеры именовались Мастерами Диониса, пользовались огромным уважением и занимали высокое общественное положение. Стать актером мог только свободный гражданин

Афин. Как и драматурги, актеры принимали активное участие в жизни города, могли занимать высокие государственные должности и даже выступать в роли послов. Победителями драматических состязаний вначале признавались только хореги и драматург. Однако начиная со второй половины V в. до н. э. в театральных состязаниях стали принимать участие и протагонисты (первые актеры).

В греческой драме количество актеров было не более трех. Поэтому каждому из них приходилось играть несколько ролей. Если в пьесе были предусмотрены немые роли, то их исполняли *статисты*. Женские роли всегда исполнялись мужчинами. Актеры обязаны были не только хорошо декламировать, но и обладать вокальным мастерством, т. к. в наиболее патетических местах драмы исполнялись арии (*монодии*). Кроме того, древнегреческий актер великолепно владел искусством жестикуляции и основами танца.

Все актеры традиционно пользовались масками, так что мимика в их игре была исключена. Изначально этот обычай был связан с культом Диониса (жрец, изображавший божество, скрывал свое лицо под маской). В театре классического периода маски утратили свое былое культовое назначение. Они давали обобщенный образ того или иного персонажа пьесы. Все маски были с открытыми ртами, чтобы свободно мог звучать голос исполнителя. Лики были «хохочущими», «скорбными», «умиротворенными» и пр. Их меняли всякий раз, как только актер переходил от веселья к печали, от бурных эмоций к спокойному расположению духа. Определенное значение имел цвет маски. Раздражение и ярость передавались багровым цветом, мудрость – голубым, хитрость – рыжим, болезнь – желтым. Исполнение женских ролей мужчинами также требовало особых масок (мужские лица были темными, а женские – более светлыми). Маски обычно изготавливались большого диаметра. Это было обусловлено размерами греческого театра. Без огромных масок лица актеров были бы не видны с последних рядов театра.

Маски изготавливали из дерева, кожи или толстой ткани. В последнем случае полотно натягивалось на каркас, покрывалось гипсом и раскрашивалось. Иногда маска закрывала не только лицо, но и всю голову. В этом случае к маске крепились парик и борода. У трагической маски над лбом делали специальный выступ, увеличивавший рост актера. В комедиях большинство масок должны были вызывать смех. Этим объясняется их карикатурный или гротескный характер. Кроме вымышленных персонажей, авторы-комедианты нередко пародировали своих современников. Маска в таком случае была шаржированным портретом (рис. 3).

Костюмы трагических актеров имитировали пышные одежды, которые носили жрецы Диониса во время религиозных церемоний. Театральный хитон, сшитый из льняной ткани, имел длинные рукава и нередко доходил до пят. Плащи были двух видов – *гиматий* (широкий плащ, укладываемый складками вокруг тела; подобные плащи носили древние служители Диониса) и *хламида* (короткий плащ с застежкой на плече). Каждый персонаж носил особую одежду. На ней вышивались различные рисунки – цветы, деревья, звезды, спирали, арабески, фигуры людей и животных. Цвет одежды также имел значение. Персонажи, которых не покидала удача, выступали в одежках с желтой или красной полосой. Синие или зеленые полосы отмечали неудачников.



Рис. 3. Маски древнегреческих актеров

На ноги актеры надевали *котурны* – башмаки с высокими голенищами. Сценические котурны имели толстые, состоящие из нескольких слоев кожи, подошвы. Это увеличивало рост актера. Чтобы придать фигуре величественность, трагические актеры укрепляли под одеждой специальные подкладки или небольшие подушки, сохраняя при этом естественные пропорции тела. В комедиях подушки и подкладки, наоборот, искажали нормальные пропорции человеческого тела и тем самым вызывали смех зрителей (рис. 4).

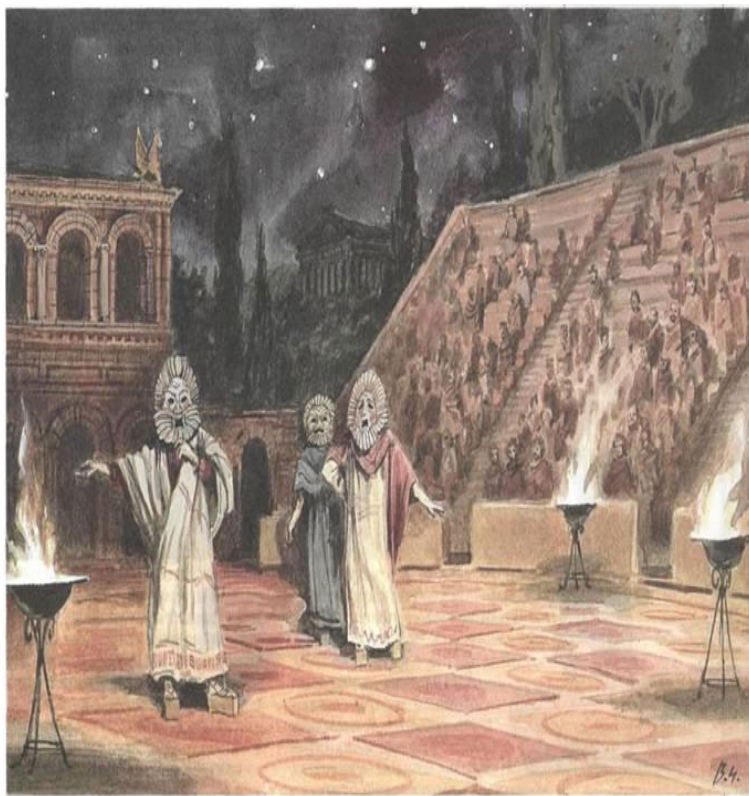


Рис. 4. Выступление античных актеров. Реконструкция

## Хор и зрители

Трагический хор насчитывал сначала 12 человек, затем состав его был увеличен до 15. В комедии же хор традиционно состоял из 24 человек. Он делился на два *полухория* и выражал точку зрения идеального зрителя. В партиях хора (*парабазах*) раскрывался основной смысл спектакля. Участники хора именовались *хоревтами*, а их предводитель – *корифеем*. Корифей (запевала) выступал от лица автора произведения, излагал его основные мысли. Нередко это был один и тот же человек (Феспид, Софокл и др.). Во главе хора, выходявшего на оркестру, шел флейтист. Он поднимался на ступени алтаря, расположенного в центре оркестры. О начале каждой пьесы извещали звуки труб.

В трагедиях хор обычно изображал людей, близких главному герою, – его друзей, родственников. Комический хор изображал не только людей, но и животных, мифологических персонажей (например, сатиров или вакханок).

Театральные представления ставили на праздниках Диониса. Все дела в это время приостанавливались. Суды закрывались, должники освобождались от уплаты долгов. Даже заключенных выпускали из тюрем, чтобы и они смогли принять участие в народных гуляниях. Вместе с мужчинами театр посещали женщины, дети и даже рабы.

Сначала зрителям было дано право самостоятельно выбирать места. Нередко дело доходило до потасовок. Драчунов разнимали служители театра. Позже, в целях устранения беспорядков и покрытия расходов на содержание театрального здания, городские власти организовали продажу входных билетов (жетонов) стоимостью в один-два обола. Это были медные кружочки, похожие на монеты. Они назывались *символами*. Вырученные от их продажи деньги передавались откупщику театра. Количество зрителей не должно было превышать числа мест в театро-не. Поэтому при выходе из театра жетоны у них изымались.

Места для различных категорий зрителей были строго регламентированы. Первый, ближайший к оркестре ряд был отведен высшим должностным лицам государства (архонтам, стратегам, навархам), верховному жрецу бога Диониса и его служителям, победителям Олимпийских и Панафинейских игр. Им, восседавшим в персональных, украшенных резьбой мраморных креслах (*проэдриях*), жетоны были не нужны.

За креслами, отделенными кольцевым проходом, располагался нижний ярус для наиболее обеспеченной публики (богатые землевладельцы, купцы, ростовщики). Каждый сектор этого яруса был помечен одной буквой, начиная с «А» (альфа). Буква была начертана на оборотной стороне жетона. На лицевой стороне изображались головы богини Афины либо льва, которых считали защитниками от недобрых сил.

Металлические жетоны, лишённые каких-либо изображений и помеченные одной буквой на обеих сторонах, служили пропусками на средний ярус. Буквы на этих жетонах обозначали клинообразные секторы для зрителей со средним достатком (зажиточных горожан, земледельцев, ремесленников, ветеранов армии и флота и пр.). В афинском театре Диониса все граждане за-

нимали свои персональные секторы по *филам* (территориальным единицам, которых в Аттике было 10).

Имелись также жетоны, помеченные парами одинаковых букв на лицевой и оборотной сторонах. Эти символы обозначали места самого верхнего яруса, где размещались скамьи для самых бедных зрителей. Им во времена Перикла государство даже установило особую («театральную») денежную выдачу – *феорик*. В IV в. до н. э. была учреждена особая «театральная» касса. Она пополнялась за счет расходов на государственные нужды. Неприкосновенность этой кассы для других целей охранялась законом вплоть до прихода македонян (339 г. до н. э.).

Драматические представления продолжались целый день. Зрители обедали прямо в театре. Они были облачены в праздничные одежды, головы украшали венками из плюща. Великие Дионисии собирали огромные толпы народа. Причем не только афинян и жителей Аттики, но и гостей со всех концов Греции. Афинская публика была очень восприимчивой и непосредственной. Если пьеса нравилась, зрители выражали свое одобрение аплодисментами и криками. Если не нравилась, то громко свистели, шелкали языками, стучали ногами. Бывали случаи, когда актера прогоняли со сцены камнями. Порой зрители требовали прекратить непонравившуюся пьесу и начать другую. То есть мнение публики во многом определяло успех или неудачу постановки, а также творческую карьеру драматурга.

### Функциональная структура древнегреческого театра

Процесс формирования монументального театрального здания неотделим от истории развития греческой драмы и комедии.

Первоначально хоревты и актеры выступали на круглой утрамбованной площадке (орхестре), вокруг которой стояли и сидели зрители. Однако очень скоро возникла потребность в иных, более совершенных, формах представления. Холмистый ландшафт Эллады подсказал зодчим наиболее рациональное решение. Орхестру расположили у подножия горы или холма, а зрители размещались на склонах. В дальнейшем на склонах были устроены монументальные ступени – сиденья для зрителей (театрон). Ступени плавно огибали круглую площадку (орхестру), на которой находились актеры и хор.

Временные деревянные сиденья устраивались еще в VI в. до н. э. Строительство «классических» каменных театров началось лишь через три столетия: «Греческое театральное здание отличается функционализмом своей архитектуры. Оно вовсе не имеет наружного объема, расположено на склоне холма и только оформляет места для зрителей, полукругом раскинувшиеся перед зданием сцены. Между сценой и зрителями помещается круглая орхестра с алтарем посередине, предназначенная для выступления хора и актеров. Единственной задачей такого здания является создание вместительного для огромного по тому времени количества зрителей...» [3, с. 149].

По мнению доктора искусствоведения, академика Н.И. Брунова (1898–1971), греческий театр является самым древним примером «функционалистического» решения светского общественного здания: «Его архитек-

турная композиция состоит в превращении склона холма в ряды сидений, ориентированных на реального человека. Единственная задача этих сидений сводится к тому, чтобы дать зрителям удобные места, поставленные по возможности все в одинаковые условия в смысле видимости и слышимости происходящего на сцене и на оркестре...» [3, с. 150] (рис. 5).



Рис. 5. Руины античного театра. Современное состояние

Демократичный характер древнегреческого театра во многом определил специфику его устройства. Он размещался под открытым небом и включал в себя три основных элемента – оркестру, сцену и театрон. Во втором томе «Всеобщей истории архитектуры» (1973) об этом сказано следующее: «Архитектура театрального сооружения развивалась в соответствии с развитием греческой драмы. Основными элементами древнейших театров, примитивное устройство которых сохранялось, по-видимому, без существенных изменений до конца VI в. до н. э., были круглая площадка (оркестра), по которой двигался хор, около нее – палатка (сцена) для переодевания актера (вначале единственного), по другую сторону – места для зрителей (театрон), обычно располагавшиеся полукругом по склону холма, около которого размещалась оркестра, чтобы создать лучшую видимость и акустику...» [6, с. 267].

Остановимся на этих трех частях древнегреческого театра более подробно. Итак, композиционным ядром театра являлась *оркестра* (греч. танцюю) – круглая или подковообразная площадка, на которой изначально выступали хор и актеры (рис. 6).

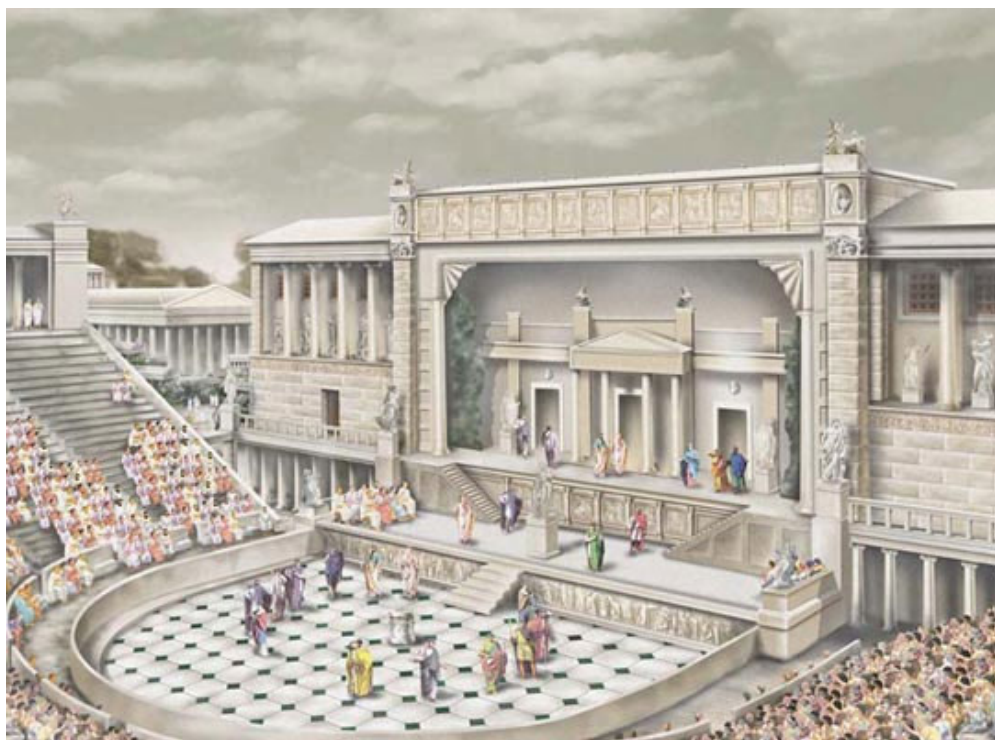


Рис. 6. Сценическая площадка древнегреческого театра. Реконструкция

Приведем выдержку римского грамматика-лексикографа Секста Помпея Феста (II в. н. э.) из его книги «De Verborum significatu» («О значении слов»): «Орхестра – место на сцене, где раньше выступали те, кто в настоящее время называются *planipedes* (босоногими), и куда не допускались актеры, за исключением тех случаев, когда они должны были пояснять фабулу, которая без этого осталась бы неясной. Босоногие же не носили легкой обуви актеров (*socci*), чтобы ровнее ступать, – отсюда и произошло их название...» [5, с. 88].

Орхестра, служившая местом действия хора, отгораживалась от зрителей каменным бортом и утрамбовывалась или мостилась каменными плитами. На ней часто воздвигался алтарь, посвященный Дионису: «На орхестре находится *фимела* (*thymelē*), представляющая собой род помоста (*bēma*), или алтарь. А за сценой, перед дверями – *агиэй* [остроконечный столб в честь Аполлона] и стол для жертвенных пирожных, называемый *theōgis* (праздничный корабль) или *thyōgis* (жертвенный стол). *Eleos* же был древний стол, на который, до Феспиды [VI в. до н. э.], становился разговаривавший с хоревтами...» (Поллукс, *Ономастикон*, IV, 123) [5, с. 73] (рис. 7).

**Скена** (*греч.* палатка или деревянная пристройка, в которой хранилась *бутафория* и переодевались актеры) – место, предназначенное для выступлений актеров. Сначала она размещалась за пределами орхестры, а затем – на ее периметре. Во времена Эсхила скена не имела никаких украшений. Перед спектаклем на ней устанавливали легкую перегородку с рядом дверей. На эту перегородку вешали живописные декорации или картины. Мизансцена носила услов-

ный характер. Дверь, через которую выходил на сцену актер, указывала на его роль в пьесе. Занавеса в греческом театре не было, хотя не исключено, что в некоторых пьесах какие-либо части сцены временно закрывались от зрителей.



Рис. 7. Принципиальная схема древнегреческого театра

Во второй половине IV или в III в. до н. э. появляется *проскений*. Это была «невысокая пристройка перед сценой, представлявшая собой ряд столбов, обработанных полуколоннами, иногда же ряд колонн, поставленных на низком стилобате на расстоянии 2–3 м от передней стены сцены, соединенных с ней деревянным горизонтальным перекрытием, укладывавшимся по каменным балкам. Высота проскения колебалась между 2,5 и 3,6 м, и его перекрытие, логейон, было на одном уровне с основным этажом сцены...» [6, с. 268] (рис. 8).

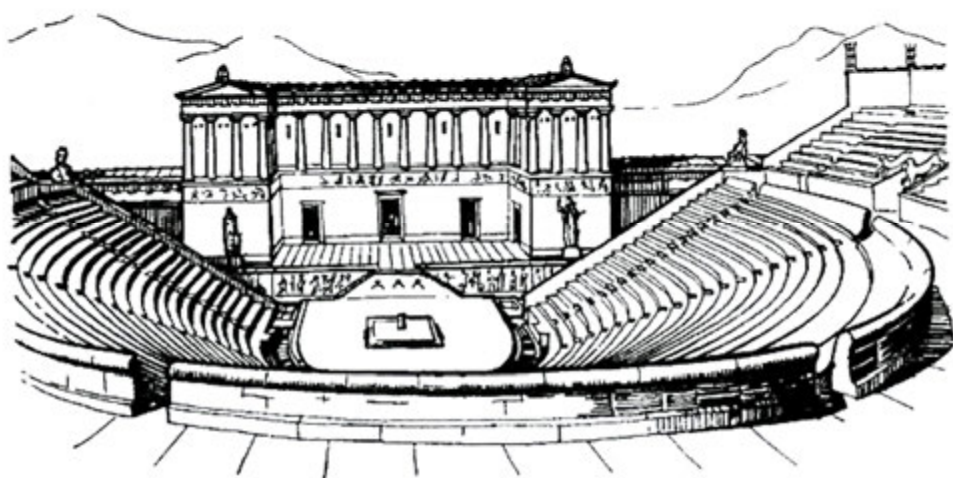


Рис. 8. Общий вид древнегреческого театра. Реконструкция

Никакой сценической площадки, высокой или низкой, поначалу не было. Поскольку в ранних трагедиях сценическое действие почти всегда разворачивалось в городской среде, то, по мнению немецкого архитектора и археолога Вильгельма Дёрпфельда (1853–1940), автора книги «Das griechische Theater» (1896), лицевая сторона проскения была решена в виде колоннады. Более подробно об этом написал Юлий Поллукс: «Гипоскеный же [в части], обращенной к театру [к орхестре] и находящейся под логейоном, украшался колоннами и статуями. Из трех дверей вдоль по сцене – [вход во] дворец, или главный дом, или пещеру, или вообще [местопребывание] протагониста [первого актера] пьесы; правая – местопребывание девтерагониста [второго актера], а левая отводится для самого незначительного действующего лица и означает или опустелое святилище или нежилую местность...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 124) [5, с. 73].

Колоннада проскения имитировала фрагмент перистильного двора жилого дома или городской площади, фасад дворца или храма. Колоннада украшала либо весь фасад скены, либо только его центральную часть. К торцам скены, возможно, уже в первой половине V в. до н. э. были пристроены два прямоугольных крыла – *параскения*. В них хранились театральные декорации и иное имущество. Если сюжет драмы требовал декоративного фона из двух-трех «зданий», проскений и параскений служили их имитациями. Параскений чаще всего применялись в театрах материковой Греции и западных колоний. В эпоху эллинизма они исчезли.

Оформление театрального действия в классический период было несложным. В дни общегородских праздников театр вообще не имел никаких украшений, кроме своего архитектурного убранства: «Части театра: pulls (дверца), psalis (крытый проход), katatomē (круговой проход), kerkides (клинья), сцена, орхестра, logeion (помост), проскений, параскений, гипоскеный [сторона фундамента, обращенная к сцене, и все подполье под проскением]...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 123) [5, с. 73].

В ранних трагедиях Эсхила на сцене возводили массивные деревянные сооружения (большой алтарь с фигурами двенадцати богов в пьесе «Умоляющие», гробница царя Дария в «Персах», скала в «Прикованном Прометее»). Входящие на сцену по орхестре поднимаются по лестницам. Ступени же лестницы называются *грядками* (theologeion).

При Софокле появились расписные декорации (пинаки), помогавшие превращать проскений в фасад дворца или дома, в переднюю стенку палатки: «В трагедии же правая дверь означает помещение для гостей (xēnon), а левая – темницу. В комедии подле дома помещается палатка (klision), представляемая занавесью. И [там] находится стойло для рабочего скота; и большие двери палатки, называемые klisiades, видимо, предназначаются для въезда повозок и нагруженных телег (sceophora)...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 125) [5, с. 73].

Перспективных «иллюзий» при этом не получалось, поскольку глубина скены была невелика.

В некоторых пьесах действие переносилось из одного места в другое (например, из города в деревню, с земли на небо либо в подземное царство). Поэтому по бокам скены во времена Софокла были установлены треугольные

вращающиеся призмы (периакты). На их гранях крепились живописные изображения природы, городской застройки, интерьеров зданий. Поворотом призм эти картины быстро менялись по ходу пьесы: «Около каждой из двух дверей, в середине сцены, есть еще две другие, по одной с каждой стороны, к которым прикреплены периакты (трехгранные призмы). Из правой двери являются прибывшие из-за города, а из левой – прибывшие из города и, главным образом, из гавани; через эту же дверь входят и морские божества и [появляется] все слишком тяжелое для переноски на машине. Когда периакты поворачиваются, то поворот правой периакты [обозначает] перемену местности (topos), а поворот обеих – перемену страны (chōra). Из пародов [проходов в оркестру] правый ведет из деревни, из гавани или из города...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 126) [5, с. 74].

Во времена Еврипида в театральных постановках начали применять хитроумные машины и механизмы. С их помощью, например, можно было создавать различные акустические эффекты: «Из приспособлений для молнии и грома одно – высокое, периакта, а приспособление для грома – наполненные камнями мехи, которые катают за сценой по медным листам...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 130) [5, с. 74].

Особым успехом у зрителей пользовалась *экиклема* – выдвигаемая площадка на низких колесах. Она показывала, что происходит или уже произошло за стеной или в соседнем помещении (например, сцены семейных ссор, убийства и т. п.): «Экиклема – высокий помост (bathron) на деревянных подпорах (epxelōn), на котором стоит кресло (thronos). Посредством нее показывается то, что скрыто [от зрителей], происходит за сценой, внутри жилища. Действие экиклемы обозначается глаголом enkyklein (оборачивать). А приспособление, которым экиклема выдвигается, называется эйскиклема. И это устройство, надо предполагать, у каждой двери и у каждого, пожалуй, дома. Машина... находится у левого парода наверху, над сценой...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 128) [5, с. 74]. Перед сценой театра в Эретрии, например, были обнаружены мраморные рельсы. По всей видимости, они предназначались для передвижения экиклемы [6, с. 269].

Не менее популярной была *эорема* (приспособление, позволявшее актерам подниматься в воздух и опускаться на землю). С его помощью на сцену являлось божество, которое легко разрешало чересчур усложнившиеся взаимоотношения героев пьесы. Известно латинское выражение *Deus ex machina* («Бог из машины»). Актер грациозно «парил» над сценой. От зрителей, впрочем, ничего не скрывалось. Им были видны веревки и крюки, которые крепились за кожаный пояс и нагрудные лямки актера, играющего роль бога:

«С помоста для богов (theologeion), находящегося над сценой, появляются в вышине боги, как Зевс и окружающие его во «Взвешивании душ» [Эсхила]. Журавль – это механизм, опускающийся сверху для поднятия трупов, которым пользуется Аврора, поднимая труп Мемнона...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 130) [5, с. 74]. «Летательными канатами называются свисающие сверху веревки, поддерживающие летящих по воздуху героев или богов...» (Поллукс, Ономастикон, IV, 131) [5, с. 74].

Во II в. до н. э. актеры-декламаторы и певцы стали выступать на особом деревянном возвышении – *логейоне* (греч. место, где говорят). Это сооружение, превратившееся в современную сценическую площадку, иногда формировало второй этаж или ярус сцены. Оно опиралось на каменные столбы квадратного сечения. Те из них, которые находились на границе оркестры, были украшены пилястрами в виде полуколонн. Со временем эти полуколонны стали традиционным архитектурным «фоном» для любого театрального представления. Сама сцена превратилась в «здание», отделенное от оркестры широким проходом (*пародом*). По этому проходу на оркестру выходили хоревты и те актеры, которые, согласно сценарию, прибывали издалека – из города, гавани или другой страны.

*Театрон* (греч. *theasthai* – «смотреть») первоначально имел неправильную форму, но уже в конце V в. до н. э. скамьи стали располагать по круговым секторам. Обычно огромный «веер» театрона был «распахнут» на 180–210°. Круговые ярусы разделялись лестничными проходами на радиальные секторы, а на краях, у сцены, завершались подпорными стенками (*аналеммами*) (рис. 9).



Рис. 9. Театр Диониса в Дельфах. Современное состояние

Театрон вмещал практически все население городка-полиса и порой достигал значительных размеров (до 140 м в диаметре): «Греческие театры были рассчитаны на то, чтобы в них могла собираться вся гражданская община; ввиду этого размеры их были весьма обширны – во много раз больше современных театров. Большая величина эллинских театров препятствовала превращению их в закрытые помещения, в чем не было и надобности в условиях греческого климата...» [6, с. 267]. Поэтому для удобства размещения и эвакуа-

ации зрителей ярусы театрона разделялись кольцевыми проходами. Со зрительских мест открывалась живописная панорама лежащего внизу города, морского берега, оливковой рощи или горных вершин, которые гармонично дополняли и оживляли театральные декорации. Архитекторы, занимавшиеся проектированием и строительством театров, обязательно производили расчет его вместимости.

Приведем фрагменты из «Стереометрики» Герона Александрийского (I в. н. э.): «Театр, большая окружность которого равна 420 футам, меньшая – 180 футам и число ступенек – 280. Определить, сколько человек он вмещает. Сделай это так: сложи большую окружность с меньшей, т. е. 420 и 180, – получается 600; возьми половину – получается 300. Умножь это число на число ступенек – получится 84 000. Столько человек он вмещает, ибо на каждом футе помещается один человек.

Вариант по другому списку: узнать, сколько человек вмещает театр, можно так. По измерении оказывается, что верхняя ступенька имеет 420 футов, а нижняя 180 футов; вместе это 600 футов. Половина этого – 300. Число же ступенек 50; это число умножь на 300 – получается 15000 футов. Столько человек вместит театр, ибо место для каждого человека имеет один фут в ширину... Другой театр, в котором ступенек, скажем, 250. Первая ступенька внизу вмещает 40 человек, верхняя 120; определить, сколько человек вмещает театр. Сделай так: сложи число человек на нижней и верхней ступеньке – получается 160; половина этого числа дает 80; умножение этого числа на 250, число ступенек, дает 20 000. Столько человек вмещает театр.

Если же этот театр, начиная от первой и кончая последней задней ступенью, вмещает на каждой ступени на пять человек больше, чем на предыдущей, и ты хочешь знать, сколько человек вмещает последняя, т. е. верхняя ступень, при условии, что первая, т. е. нижняя, вмещает 40 человек и театр имеет 250 ступеней, сделай так. Вычти из 250 ступеней единицу, остаток будет 249; умножь это число на 5 – получается 1245; прибавь 40 человек первой ступеньки и получится 1285. Столько человек вмещает последняя ступень вверху (по другому варианту берется 50 ступеней). В обоих случаях вычисление основано на формуле арифметической прогрессии:  $a_n = a + (n - 1) d \dots$  (Герон, Стереометрика, I, 42–44) [5, с. 71].

Древнегреческие театры поражают своей безупречной акустикой. Самый легкий шорох доносился с оркестры до самых верхних скамей театрона. Видимо, это зависело от формы театрона и от умелого размещения его на склоне горы. В пятой книге своего трактата «Об архитектуре» Витрувий (I в. до н. э.) написал следующее: «Надо рассчитывать так, чтобы линия, проведенная от самого нижнего до самого верхнего сиденья, касалась всех вершин и углов ступеней, – тогда голос не встретит препятствий...» (V, 3, 4) [7, с. 91, 92].

Солнце прогревало каменную оркестру и долину за ней. Потoki горячего воздуха поднимались вверх по ступеням театрона и усиливали звук. Об этом явлении в «Естественной истории» написал Гай Плиний Секунд (Старший) (23–79 гг. н. э.): «Голос обладает удивительным и достойным упоминания свойством. В оркестре театра он поглощается насыпанными опилками

или песком, а также окружением грубо отделанных стен и пустыми бочками. Но он же распространяется по прямой или вогнутой стене, и если не препятствует какая-либо неровность, то слово, сказанное даже тихим голосом, доносится до другого конца...» (XI, 51, 112) [5, с. 88].

Витрувий одним из первых обратил внимание на волновую природу звука: «Голос есть текучая струя воздуха, которая, соприкасаясь со слухом, ощущается им. Голос двигается по бесконечно расширяющимся окружностям, подобно тем бесчисленным кругам волн, какие возникают на спокойной воде, если бросить в нее камень, и которые распространяются, расходясь из центра, как только могут шире, если их не прерывает теснота места или какие-либо препятствия, мешающие завершиться очертаниям этих волн. Если же они прерываются препятствиями, то первые из них, отливая назад, расстраивают очертания последующих... Таким же образом и голос совершает круговые движения; но на воде круги двигаются по поверхности лишь в ширину, а голос распространяется не только вширь, но постепенно восходит ввысь. Поэтому то, что происходит с очертаниями волн на воде, относится и к голосу: если никакое препятствие не прерывает первую волну, она не расстраивает ни вторую, ни последующие, но все они без всякого отражения доходят до ушей и самых нижних, и самых верхних зрителей... Ради этого древние архитекторы, идя по стопам природы, строили ступени театров на основании исследования восходящего голоса и путем математической каноники и теории музыки старались, чтобы всякий звучащий со сцены голос доходил до ушей слушателей отчетливее и приятнее...» [V, 3, 6–8] [7, с. 92].

В некоторых театрах силу звука иногда увеличивали при помощи особых сосудов-резонаторов, которые были вмонтированы в конструкцию трибун: «Если же спросят, в каком театре это [«эхей» или голосники] было применено, то мы такого театра в Риме указать не можем, но зато они есть в разных местностях Италии и во многих городах Греции. К тому же мы имеем в качестве свидетеля Луция Муммия, который, разрушив театр коринфян [в 146 г. до н. э.], вывез его бронзовые голосники в Рим и из своей добычи посвятил их храму Луны...» (V, 5, 8) [5, с. 96, 97]. Но в исследованных до настоящего времени греческих театрах «пока не удалось обнаружить следов каких-либо резонаторов, помещавшихся, согласно описанию Витрувия, под скамьями для зрителей» [6, с. 270].

Таким образом, в V–IV вв. до н. э. достигли совершенства классические разновидности театральных представлений – трагедия, комедия, пантомима и пр. В этот же период окончательно сложилась функциональная схема древнегреческого театрального здания. Монументальные каменные театры возводились в самых различных городах Греции. В том числе и в итальянских колониях, где с ними впервые познакомились римляне. Античные театры отличались друг от друга размерами, вместимостью, композиционным и конструктивным решением, особенностями взаимодействия с окружающим ландшафтом и многими иными качествами. Этой тематике будет посвящена наша следующая статья, в которой мы рассмотрим наиболее знаменитые театральные здания Древней Греции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков, Е.Н. Римский театр – история становления / Е.Н. Поляков // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 2 (39). – С. 9–23.
2. Поляков, Е.Н. Театр Марцелла – культурно-идеологический манифест императора Августа / Е.Н. Поляков // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3 (40). – С. 14–28.
3. Брунов, Н.И. Очерки по истории архитектуры: В 3-х т. Т. 2. Греция – Рим – Византия / Н.И. Брунов. – М.-Л. : Академия, 1935. – 621 с.
4. Поляков, Е.Н. Телестерион – архитектурный символ Элевсинских мистерий / Е.Н. Поляков // Известия вузов. Строительство. – 1996. – № 1. – С. 115–121.
5. Зубов, В.П. Архитектура античного мира. Материалы и документы по истории архитектуры / В.П. Зубов, Ф.А. Петровский. – М. : Изд. Академии архитектуры СССР, 1940. – 519 с.
6. Всеобщая история архитектуры (ВИА): В 12 т. Т. 2. Архитектура античного мира (Греция, Рим). – Изд. 2-е – М. : Изд. литературы по строительству, 1973. – 712 с.
7. Витрувий. Десять книг об архитектуре / Витрувий. Репринтное издание. – М. : Архитектура-С, 2006. – 328 с.

## REFERENCES

1. Polyakov, E.N. Rimskii teatr – istoriya stanovleniya [Roman theatre: history of formation]. *Vestnik TSUAB*, 2013, No. 2. Pp. 9–23. (rus)
2. Polyakov, E.N. Teatr Martsella – kul'turno-ideologicheskii manifest imperatora Avgusta [Marcell theater is the cultural-ideological manifest of Emperor August]. *Vestnik TSUAB*, 2013, No. 3. Pp. 14–28. (rus)
3. Brunov, N.I. Oчерki po istorii arkhitektury: [History of architecture essays] in 3 vol. V. 2. Greece – Rome – Byzantium. Moscow; Leningrad : Akademiya, 1935. 621 p. (rus)
4. Polyakov, E.N. Telesterion – arkhitekturnyi simvol Elevsinskikh misterii [Telesterion is an architectural symbol of Eleusis]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1996. No. 1. Pp. 115–121. (rus)
5. Zubov, V.P., Petrovskii, F.A. Arkhitektura antichnogo mira. Materialy i dokumenty po istorii arkhitektury [Architecture of the Ancient world]. Moscow : Izd. Akademii arkhitektury SSSR [USSR Academy of Architecture Publisher], 1940. 519 p. (rus)
6. Vseobshchaya istoriya arkhitektury (VIA) [General History of Architecture]: in 12 vol. V. 2. Arkhitektura antichnogo mira [Architecture of Ancient world (Greece, Rome)]. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Stroyizdat Publishers the State Publishing House of Books on Construction and Architecture, 1973. 712 p. (rus)
7. Vitruvius, M. Desyat' knig ob arkhitekture [Ten Books on Architecture]. Moscow : Arkhitektura-S, 2006. 328 p.

УДК 711.424

*МЕЕРОВИЧ МАРК ГРИГОРЬЕВИЧ, канд. архит., докт. ист. наук,  
профессор, член-корр. РААСН,  
memark@inbox.ru  
Иркутский государственный технический университет,  
664028, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83*

## **РАССЕЛЕНИЕ В СССР В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ**

Статья посвящена изучению градостроительной и расселенческой политики начального этапа индустриализации. В ней рассматривается соцгород как базовое понятие советской градостроительной теории этого периода. Раскрываются функции социалистических городов – центров новой системы расселения. Доказывается, что расчет численности населения соцгородов был прямой производной от потребности промышленного предприятия в рабочей силе.

**Ключевые слова:** искусственная урбанизация в СССР; индустриализация; расселенческая политика; соцгород; расчет численности населения соцгорода.

*MARK G. MEEROVICH, DSc, Professor, RAACS member-corr.,  
memark@inbox.ru  
Irkutsk State Technical University,  
83, Lermontov Str., 664028, Irkutsk, Russia*

## **SETTLEMENT IN THE USSR AT THE BEGINNING OF INDUSTRIALIZATION**

The paper is devoted to studying town-planning and settlement policy in the USSR at the beginning of industrialization. A socialist city is considered as a basic concept of the Soviet town-planning theory of that period. The paper presents functions of socialist cities, centres of the new system of settlement. It is shown in this paper, that estimation of a socialist city population depends on needs in work-force of an industrial enterprise.

**Keywords:** artificial urbanization in the USSR; industrialization, settlement policy; socialist city; estimation of population.

В СССР создание организационных, технологических, финансовых, ресурсных и прочих основ военного производства осуществлялось под полным контролем государства. Осмысленно, планомерно и целенаправленно. Именно оно и было названо «индустриализацией». Ради нее проводились экономические и социальные реформы. Ради нее массы крестьян, благодаря программе коллективизации, принудительно отрывались от земли и перебрасывались в города, где «пролетаривались», включались в производственно-бытовые коллективы, а затем в организованном порядке направлялись на возведение новых промышленных объектов. Ради нее прокладывались транспортные артерии и разрабатывались природные ископаемые. Ради успехов индустриализации пропаганда призывала советских людей напрягать все силы и жертво-

вать личным благополучием и комфортом, а карательная система заставляла их это делать.

Индустриализация изначально не ставила своей целью улучшение благосостояния народа, т. е. расширение ассортимента продуктов питания, товаров бытового потребления, развитие торговли, сферы услуг, досуга, улучшение жилищных условий и т. п. Напротив, все ресурсы, все интеллектуальные и физические силы государства, в ущерб повседневной жизни населения, направлялись на создание самого мощного в мире военно-промышленного комплекса.

Стратегия промышленного развития СССР основывалась на опыте участия России и других капиталистических стран в Первой мировой войне, который показал, как сложно и подчас драматично гражданская промышленность перестраивалась с началом военных действий на выпуск военной продукции – вынужденно, постепенно, под натиском обстоятельств, следуя требованиям момента. В результате представления большевиков об индустриальном развитии России основывались на нескольких глобальных постулатах: 1) приоритетное развитие современной военной промышленности (т. к. опыт Первой мировой войны показал, насколько эффективно военная индустрия, централизованно управляемая государством, способна инициировать развитие практически всех сфер промышленного производства); 2) максимальная добыча природных ресурсов не только в целях внутреннего использования, но и для экспорта (во-первых, чтобы было чем рассчитываться с зарубежными торговыми партнерами при закупке передовых технологий, а во-вторых, чтобы сделать Европу политически сговорчивей, поставив ее в зависимость от советского сырья); 3) ускоренное развитие энергетической системы, без которой было невозможным существование современного энергоемкого производства; 4) развитие транспортной структуры, необходимой для осуществления производственно-технологической связности отдаленных частей страны.

Возведение в местах добычи и переработки сырья новых промышленно-энергетических комплексов порождало устройство здесь же селитьбы для размещения трудового контингента, сначала строителей комбината, а потом его работников [1]. В статье продолжается изучение градостроительной и расселенческой политики начального этапа индустриализации [2]. Переход с началом первой пятилетки от проектирования советских рабочих поселков, возводившихся в течение 1920-х гг., к поселениям более крупного масштаба – социалистическим городам – был вызван прежде всего ростом величины промышленного предприятия (именуемого «градообразующим»), потому что именно оно предопределяло численность населения обслуживающего его рабочего поселка или города) в результате превращения его из отдельного здания в комплекс технологически связанных производств. Прямым следствием этого стал рост расчетной численности населения от 3 или 10–15 тыс. в соцпоселках до 100–150 и даже 200–300 тыс. в соцгородах. Рост численности населения сказывался на величине занимаемой городом территории и на усложнении ее планировочной структуры. Например, если в советском рабочем поселке присутствовала двухуровневая структура: жилой дом – квартал,

то в соцгороде – уже трехуровневая: многоквартирный жилой дом (или жилой комплекс) – квартал – район [3].

Советская градостроительная политика конца 1920 – начала 1930-х гг. являлась прямым следствием государственного планирования мощностей возводимых промышленных предприятий, т. к. расчет нормативной численности населения соцгорода-новостройки был всецело предопределен количеством рабочих градообразующего предприятия. Население и, как следствие, объем проектируемого и возводимого жилого фонда, количество объектов обслуживания, их вместимость и прочее исчислялось по формуле, в которой ключевым показателем было число рабочих градообразующего предприятия:  $\Sigma N = R(K)$ , где  $\Sigma N$  – искомая численность населения соцгорода;  $R$  – количество работников градообразующего промышленного предприятия;  $K$  – коэффициент семейности. Предусматривалось, что члены семьи рабочего градообразующего предприятия либо учатся, либо, в обязательном порядке, занимают свои рабочие места на вспомогательных объектах, сооружениях коммунальной инфраструктуры, местном транспорте, в сфере обслуживания, советских учреждениях и т. п. Этот расчет не допускал наличия нетрудоустроенных категорий населения, исключал естественные миграции, не предусматривал саморазвития поселения и произвольных колебаний численности его обитателей – в соцгороде должны были сначала жить строители градообразующего объекта и селитьбы при нем, а затем работники этого предприятия или учреждений административного, технического, силового, культурного, бытового и прочего обслуживания [4].

Концептуальное требование территориальной привязки к промышленному предприятию специально перемещенных и расселенных подле него трудовых ресурсов приводило к тому, что социалистические города в ходе проектирования, еще во время вычерчивания на бумаге, задолго до начала рытья первых котлованов, уже «вырождались» в большую «заводскую слободу», в которой качество жизни по значимости оказывалось на последнем месте, далеко отступая перед важностью исполнения промышленно-производственных заданий. Подобная практика приводила к тотальному поглощению задач развития городов задачами развития производства, в результате чего соцгород изначально становился «поселением при производстве», не обладавшим самостоятельной социокультурной значимостью и механизмами саморазвития.

Социалистические города – новые поселения нового общественного строя – были призваны концептуально-теоретически являть новый, ранее не виданный образ жизни. Комфортный, свободный (т. е. творческий), спортивный, высококультурный; общественный (т. е. предусматривающий не только совместный труд, но и совместный быт, отдых и созидательный досуг); здоровый; саморазвивающийся и т. п. Но эта картина, увы, рисовалась лишь на словах или на бумаге конкурсных архитектурных проектов. В реальности же соцгорода-новостройки – рабочие слободы при производстве представляли собой всего лишь несколько десятков каменных полублагоустроенных домов, предназначенных для семей начальства и передовиков производства, а также гостиницу для приезжих и общежития для наиболее высокопоставленных совслужащих, возвышающихся посреди бескрайнего

моря барачков, а также землянок, кибиток, палаток... вообще лишенных воды и канализации [5, 6].

Основным типом жилья в соцгородах для размещения контингента строителей, заводских рабочих и трудящихся обслуживающих предприятий было коммунальное жилище во всех своих проявлениях. Задачи формирования условий нормального существования и благоприятной среды для жизнедеятельности людей отходили на второй план или вообще не ставились, а лишь идеологически провозглашались. Крайние и слабозаселенные территории страны «заполнялись» новым населением не в результате создания здесь более привлекательных, более качественных, более комфортных, чем в центральных городах, условий жизни, а за счет директивного перемещения сюда демобилизованных красноармейцев, принудительной отправки трудомобилизованных или ссыльнопереселенцев [5]. Промышленно развитые центральные районы использовались как базовые для социально-культурной «переработки» в пролетариат крестьянского населения, выдавливаемого в города коллективизацией. А срединные и северные, практически пустующие части страны, но являвшиесяместилищем разнообразных природных ресурсов, входили в программу индустриализации в качестве территориальных ареалов, которые следует осваивать, в основном, с использованием принудительного труда.

Советская власть оказывалась равнодушной к авангардным градостроительным теоретическим доктринам, предлагаемым архитекторами, санитарными врачами, общественными и даже государственными деятелями и др. [7]. Она оказывалась глухой к призывам экономгеографов и социологов предусмотреть и заблаговременно создать все, что необходимо для осуществления продуманной и подготовленной миграционной политики по перемещению трудовых ресурсов в зоны нового территориального освоения и колонизации. Она игнорировала практические усилия политиков, транспортников, красных директоров и других, стремившихся заранее обеспечить нормальные условия для жизни и труда рабочих на новостройках и в местах добычи полезных ископаемых.

Ей не нужны были скрупулезно продуманные теории, грамотные проектные решения, заранее сделанные реалистичные расчеты и откорректированные на их основе планы и программы. Все это представлялось ей одинаково бессмысленным в условиях, когда единый пятилетний план предусматривал конкретный результат и, исходя из него, диктовал предельно сжатые сроки и максимально ускоренные темпы выполнения.

Власти нужно было совершенно иное – обеспечивать возведение, а затем бесперебойную эксплуатацию ассимилированных «военно-гражданских» предприятий [8], принудительное комплектование кадров строителей, а затем промышленных рабочих, привязку людей к месту работы, несмотря на отсутствие необходимых условий быта и отдыха, и контроль повседневного поведения людей за счет «прозрачности» переуплотненного коммунального уклада. Ей нужно было иметь такое административно-территориальное устройство поселений, районов, краев и округов, в конечном счете страны в целом, которое позволило бы осуществлять каждодневную трудомобилизационную организацию населения, а если понадобится, то и экстренную – военно-

мобилизационную. Только красивые слова о прелестях будущей жизни были востребованы, поскольку побуждали людей к каждодневному интенсивному труду и придавали хоть какую-то осмысленность повседневному нищенскому существованию.

Посредством соцгородов власть осуществляла: а) трудомобилизационные мероприятия – закрепление на новых местах обитания перераспределенной рабочей силы в целях использования ее для отправления всеобщей трудовой повинности; б) административное руководство фрагментом единой общегосударственной системы производства; в) всеобщее плановое государственное распределение вещей, продуктов, социальных благ между членами социально-трудовых коллективов; г) военно-мобилизационные мероприятия [9].

Сознательно закрепляя за новыми крупными индустриальными центрами роль опорных узлов единого общегосударственного производственно-распределительного каркаса и присваивая им функцию центров территориальной организации населения, власть выстраивала тем самым систему партийно-административного управления, рассматривая ее в качестве важнейшего атрибута государственности. Хозяйственно-экономическое районирование сознательно совмещалось с районированием административно-политическим и становилось практической основой перераспределения населения по территории страны (расселения) и градостроительной политики (проектирования и строительства новых городов и рабочих поселков). Новые населенные пункты, возводимые с началом первой пятилетки в местах расположения строящихся промышленных, энергетических объектов и узлов, связывавших их транспортных артерий, становились опорными пунктами новой системы расселения.

Именно программа индустриализации диктовала, сколько и каких заводов и фабрик следует построить, чтобы сформировать единую технологическую сеть производств, способных максимально быстрыми темпами осваивать природные запасы сырья, инициировать заселение и освоение новых территорий, массово производить промышленную продукцию и быть предельно неуязвимыми во время возможных боевых действий [10, 11].

К 1929 г. Госплан завершил разработку теоретических принципов территориального членения страны и наметил производственно-экономический потенциал неосвоенных регионов, а также потребность в рабочей силе, необходимой для их освоения. В результате практической реализации плана первой пятилетки в конце 1920 – начале 1930-х гг. в СССР в таких традиционных для России ареалах индустриального освоения, как Ленинградская область, Горьковский край, Средняя Волга, Урал, а также в слабоосвоенных и даже совсем не освоенных на тот момент регионах, как Западно-Сибирский и Восточно-Сибирский, Северный край, Южный Казахстан, Средняя Азия, Дальний Восток, Северный Кавказ, началось интенсивное возведение комплексов военно-промышленных предприятий. Объекты ВПК и ассимилированные с ними гражданские предприятия размещались, во-первых, в местах, выгодных с точки зрения минимизации затрат на промышленное строительство (ровные строительные площадки, наличие проточной воды и т. п.); во-вторых, в местах, наиболее приемлемых в отношении выработки и снабжения электроэнергией, жизненно необходимой для энергоемкой тяжелой промышлен-

ности; в-третьих, как можно ближе к местам залегания полезных ископаемых; в-четвертых, в зонах, оптимальных с точки зрения формирования макрорегиональных транспортных систем; в-пятых, в местах, недосигаемых для бомбовых ударов авиацией вероятного противника (эта стратегия полностью оправдала себя во время Второй мировой войны).

### Выводы

1. Новая система расселения, созданная в СССР в начале – середине 1930-х гг. в результате реализации программ индустриализации и коллективизации, целиком и полностью была производной от расположения промышленных новостроек: заводов-гигантов, электростанций, железнодорожных узлов, мест первичной переработки сырья и т. п.

2. Она сознательно создавалась как вторичная по отношению к новому «промышленному районированию», являвшемуся основой для определения мест размещения промышленных новостроек, базисом районной планировки и фундаментом советской государственной градостроительной политики.

3. Количество населения соцгородов, закреплявших перераспределенную на новые места обитания рабочую силу, рассчитывалось исходя из потребной численности трудовых ресурсов градообразующего предприятия по формуле

$$\Sigma N = R(K),$$

где  $\Sigma N$  – искомая численность населения соцгорода;  $R$  – количество работников градообразующего промышленного предприятия;  $K$  – коэффициент семейности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Меерович, М.Г.* Концепция социалистического расселения / М.Г. Меерович // Архитектон: известия вузов. – 2008. – № 3 (23). – Условия доступа : [http://archvuz.ru/2008\\_3/7](http://archvuz.ru/2008_3/7) – на русс. яз.; (дата обращения : 17.06.2013).
2. *Меерович, М.Г.* Соцгород – базовое понятие советской градостроительной теории первых пятилеток / М.Г. Меерович // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4 (25). – С. 50–56.
3. *Меерович, М.Г.* Соцгород / М.Г. Меерович. – 2012. – Условия доступа : [http://alyoshin.ru/Files/publika/meerovich/meerovich\\_sots.html](http://alyoshin.ru/Files/publika/meerovich/meerovich_sots.html).) – на русс. яз.; (дата обращения : 23.06.2012).
4. *Меерович, М.Г.* СССР как Мегaproект. Числовые регулятивы искусственного формирования населения соцгородов / М.Г. Меерович. – 2008. – Условия доступа : [http://archi.ru/lib/publications\\_virtual.html?fl=5&sl=3](http://archi.ru/lib/publications_virtual.html?fl=5&sl=3); (дата обращения : 22.11.2008).
5. *Меерович, М.Г.* Типология массового жилища соцгородов-новостроек 1920–1930-х гг. / М.Г. Меерович // Архитектон: известия вузов. – 2010. – № 31. – Условия доступа : [http://archvuz.ru/2010\\_3/6](http://archvuz.ru/2010_3/6) – на русс. яз.; (дата обращения : 17.06.2013).
6. *Меерович, М.Г.* Эрнст Май: «Рациональное» жилье для России / М.Г. Меерович // Архитектон: известия вузов. – 2011. – № 4 (36). – Условия доступа : [http://archvuz.ru/2011\\_4/14](http://archvuz.ru/2011_4/14) – на русс. яз.; (дата обращения : 17.06.2013).
7. *Меерович, М.Г.* Урбанизм или дезурбанизм? Дискуссия о будущем советских городов / М.Г. Меерович // Архитектон: известия вузов. – 2012. – № 1 (37). – Условия доступа : [http://archvuz.ru/2012\\_1/13](http://archvuz.ru/2012_1/13) – на русс. яз. (дата обращения : 17.06.2013).
8. *Меерович, М.Г.* Ассимиляция производства / М.Г. Меерович // По материалам книги Л. Самуэльсона «Красный колосс». Правда Виктора Суворова-2. Восстанавливая историю Второй мировой / сост. Д. Хмельницкий. – М. : Яуза-пресс, 2007. – С. 144–154.

9. *Меерович, М.Г.* Дискуссия о соцрасселении. Социалистический город – новый тип управления хозяйственно-производственными процессами. – 2008. – Условия доступа : [http://archi.ru/lib/e\\_publication.html?id=1850569764](http://archi.ru/lib/e_publication.html?id=1850569764) (дата обращения : 22.11.2008).
10. *Меерович, М.Г.* Исторические корни современных проблем российского градостроительства / М.Г. Меерович // Проект Байкал. – 2010. – № 23. – С. 153–154.
11. *Меерович, М.Г.* Политическая история советского градостроительства / М.Г. Меерович // Проект Байкал. – 2008. – № 18. – С. 46–49.

#### REFERENCES

1. *Meerovich, M.G.* Kontsepsiya sotsialisticheskogo rasseleniya [A concept of socialist settlement]. Architecton: Proceedings of Higher Education. 2008. No. 3 (23). Access conditions: [http://archvuz.ru/2008\\_3/7/](http://archvuz.ru/2008_3/7/); date of access: 17.06.2013. (rus)
2. *Meerovich, M.G.* Sotsgorod – bazovoe ponyatiye sovetskoi gradostroitel'noi teorii pervykh [Socialist city is a basic concept of the soviet town-planning theory of the first five-year plans]. *Vestnik TSUAB*. 2009. No. 4. Pp. 50–56. (rus)
3. *Meerovich, M.G.* Sotsgorod [Socialist city] 2012. Access conditions: [http://alyoshin.ru/Files/publika/meerovich/meerovich\\_sots.html](http://alyoshin.ru/Files/publika/meerovich/meerovich_sots.html).); date of access: 23.06.2012. (rus)
4. *Meerovich, M.G.* SSSR kak Megaproekt. Chislovye regulyativy iskusstvennogo formirovaniya naseleniya sotsgorodov [The USSR as a Megaproject. Numerical regulations of artificial formation of population of socialist cities] 2008. Access conditions : [http://archi.ru/lib/publications\\_virtual.html?fl=5&sl=3](http://archi.ru/lib/publications_virtual.html?fl=5&sl=3); date of access: 22.11.2008. (rus)
5. *Meerovich, M.G.* Tipologiya massovogo zhilishcha sotsgorodov-novostroek 1920-1930-kh gg. [Large-scale new housing typology of socialist cities in 1920s and 30s]. Architecton: Proceedings of Higher Education. 2010. Access conditions: [http://archvuz.ru/2010\\_3/6/](http://archvuz.ru/2010_3/6/); date of access: 17.06.2013. (rus)
6. *Meerovich M.G.* Jernst Maj: «Ratsional'noe» zhil'e dlya Rossii [Ernst May: 'Rational' house for Russia]. Arhitekton: izvestija vuzov. 2011. No. 4 (36). Access conditions: [http://archvuz.ru/2011\\_4/14/](http://archvuz.ru/2011_4/14/); date of access: 17.06.2013. (rus)
7. *Meerovich, M.G.* Urbanizm ili dezurbanizm? Diskussiya o budushhem sovetskikh gorodov. [Urbanism or non-urbanism? Discussion on future soviet cities]. Architecton: Proceedings of Higher Education. 2012. No. 1(37). Access conditions: [http://archvuz.ru/2012\\_1/13/](http://archvuz.ru/2012_1/13/); date of access: 17.06.2013. (rus)
8. *Meerovich, M.G.* Assimilyatsiya proizvodstva [Industrial assimilation]. Source L. Samuelson 'Röd Koloss'. Pravda Viktora Suvorova-2. Vosstanavlivaja istoriju Vtoroj Mirovoj. Originated by D. Khmel'nitskii. Moscow : Jauza-press, 2007. 320 p., Pp. 144–154. (rus)
9. *Meerovich, M.G.* Diskussiya o sotssasselenii. Sotsialisticheskii gorod – novyi tip upravleniya khozyaistvenno-proizvodstvennymi protsessami [Discussion on socialist settlement. A socialist city is a new type of economic and industrial management]. 2008. Access conditions: [http://archi.ru/lib/e\\_publication.html?id=1850569764](http://archi.ru/lib/e_publication.html?id=1850569764); date of access: 22.11.2008. (rus)
10. *Meerovich, M.G.* Istoricheskie korni sovremennykh problem rossiiskogo gradostroitel'stva [Historical origins of modern problems of Russian town-planning]. Proekt-Baikal. 2010. No. 23. Pp. 153–154. (rus)
11. *Meerovich, M.G.* Politicheskaya istoriya sovetskogo gradostroitel'stva [Political history of soviet town-planning]. Proekt-Baikal. 2008. No.18. Pp. 46–49. (rus)

УДК 728.001

МОЛЧАНОВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ, канд. архит., профессор,  
*Vimolchanov@yandex.ru*

БЛАГОВА МАРИАННА ВИКТОРОВНА, аспирант,

*Molchanova\_ma@mail.ru*

Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета,  
344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39

## СОЦИАЛЬНО-АРХИТЕКТУРНАЯ ТИПОЛОГИЯ СОВРЕМЕННОГО КОММЕРЧЕСКОГО ЖИЛИЩА В РОССИИ

Проанализированы теоретические архитектурно-типологические концепции рыночного жилища в России. Предложена социально-архитектурная типология коммерческого жилища: доступное коммерческое жилище, предназначенное для потенциально среднего класса; комфортабельное коммерческое жилище, предназначенное для среднего класса; высококачественное коммерческое жилище, предназначенное для высшего класса.

**Ключевые слова:** коммерческое жилище; типология коммерческого жилища.

VIKTOR M. MOLCHANOV, PhD, Professor,

*Vimolchanov@yandex.ru*

MARIANNA V. BLAGOVA, Research Assistant,

*Molchanova\_ma@mail.ru*

Academy of Architecture and Arts, Southern Federal University,  
39, Budennovskii Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia

## SOCIAL AND ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF MODERN COMMERCIAL HOUSING IN RUSSIA

Architectural, typological, and theoretical concepts of the market dwelling in Russia are analyzed in this paper. The social and architectural typology of commercial dwelling is suggested, namely: affordable housing for below middle class; a comfortable commercial housing for middle class; a high-quality commercial housing for upper class.

**Keywords:** commercial housing; typology; commercial housing.

Обоснование социально-архитектурной типологии современного коммерческого жилища в России весьма актуально, т. к. основной чертой новой архитектуры коммерческого жилища является его социальная адресность [3]. Это означает, что каждой социальной группе клиентов коммерческой архитектуры, имеющей свои особенные характеристики образа жизни, уровень дохода и способ решения жилищной проблемы, соответствует вполне конкретный тип жилища.

На сегодняшний день единая система классификации социально-архитектурной типологии жилища не сформировалась. В связи с этим было рассмотрено типологическое устройство жилища на основе сравнительного анализа концепций рыночного жилища, приведенного в таблице, определены

особенности российской типологии рыночного жилища в зависимости от социально-имущественного класса потребителя.

Исходя из специфики современной социальной структуры российского общества, где преобладает низший класс (около 80–85 %), в который входит небольшая часть собственно низшего класса (около 10 %) и значительная часть (около 70 %) потенциально среднего класса (или «ниже среднего»); средний класс (10–19 %) и высший (до 4 %) [8, 1], клиентом коммерческой жилищной архитектуры может быть значительная часть населения, включая потенциально средний класс, средний и высший класс (социальную элиту) – 90 % населения. Поэтому анализ концепций типологической классификации коммерческого жилища в данной работе «привязан» к социально-имущественным классам клиента, что позволит точнее определить архитектурные и потребительские характеристики жилища. В качестве критериев для количественного сравнения взята специальная шкала жилищной обеспеченности, предложенная проф. К.К. Карташовой в исследованиях социально-демографических основ формирования жилища [2].

### Сравнение архитектурно-типологических концепций рыночного жилища по социально-имущественным классам потребителя

Исследователи	Критерии	Социально-имущественный класс потребителя					
		Низкий и потенциально средний, 80–85 %			Средний, 10–19 %	Высший, до 4 %	
		Низкий, 10,8 %	Потенц. средний, 70,2 %				
К.К. Карташова (1985 г.)	Класс	Специальная шкала					
	Норма жилищной обеспечен.	5 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.	7–9 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.	12–13 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.	13,5–15 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.	16–18 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.	20–25 м <sup>2</sup> жилой площ./чел.
В.В. Кутузов (1994 г.) [5]	Норма жилищной обеспечен.	20 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	20–24 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	24–26 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	26–28 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	28–30 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	28–32 м <sup>2</sup> общей площ./чел.
	Формы владения и собств.	Социальная аренда	Социальная аренда	Кооперативная аренда	Частная аренда	Собственная квартира	Собственный дом
В.М. Молчанов (1999 г.) [9]	Класс	Экономичное жилище		Комфортабельное жилище	Высококачественное		
		Минимальное жилище	Доступное				
	Норма жилищной обеспечен.	9 м <sup>2</sup> жилой, 13,5 м <sup>2</sup> общей площ./чел.		12 м <sup>2</sup> жилой, 18 м <sup>2</sup> общей	28–32 м <sup>2</sup> общей площади на человека	более 32 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	
	Формула заселения	$k = n - 1$		$k = n$	$k = n + 1$	$k = n + 3$ и более	
Основной тип жилища	Квартира, типовый дом		Квартира, коттедж	Блок-квартира, особняк	Индивидуал. дом-вилла		

Продолжение таблицы

Исследователи	Критерии	Социально-имущественный класс потребителя					
		Низкий и потенциально средний, 80–85 %		Средний, 10–19 %	Высший, до 4 %		
		Низкий, 10,8 %	Потенц. средний, 70,2 %				
А.А. Магай (2003 г.) [7]	Класс			Эконом-класс	Бизнес-класс	Элитный класс	Эксклюзивный класс
	Основной тип жилища			Жилой дом типовой серии	Жилые дома с минимальным набором помещений инфра-структ.	Жилые дома с максимальным набором помещений инфра-структ.	Клубный жилой дом, пентхаус
К.В. Кляненко (2005 г.) [3]	Класс	Традиционное социальное жилище	Жилища соц. эксперимента	Демократическая архитектура соучастия	Массовое коммерческое жилище		Элитарное коммерческое жилище
	Тип жилища	Многоэтажные секционные, галерейные, коридорные. С 1970 г. средние и малоэтажные секционные и блокированные	Концептуальное проектирование	Нестандартные, часто новаторские объемно-пространственные решения. Секционно-блокированные, секционно-галерейные, индивидуально блокир.	В сложившихся районах – преимущественно многоэтажные структуры с внутренней организацией, малоэтажные секционные и блокированные дома. В районах нового освоения – индивидуальные отдельно стоящие и блокированные дома		Преимущественно односемейные отдельно стоящие дома – коттедж, вилла, особняк, ранчо, пентхаус
Е.В. Кайдалова (2005 г.) [1]	Класс				Эконом-класс	Бизнес-класс	Элитный класс
	Норма жилищной обеспеченности				13–15 м <sup>2</sup> жилой и от 20 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	16–18 м <sup>2</sup> жилой и от 30 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	20–25 м <sup>2</sup> и более жилой и от 50 м <sup>2</sup> общей площ./чел.

Продолжение таблицы

Исследователи	Критерии	Социально-имущественный класс потребителя						
		Низкий и потенциально средний, 80–85 %			Средний, 10–19 %		Высший, до 4 %	
Н.М. Согомонян (2005 г.) [10]	Класс				<b>Экономичный дом</b>	<b>Комфортный дом</b>	<b>Частное жилище</b>	
	Норма жил. обеспечен.				21 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	28 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	45 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	
С.М. Лызжин (2006 г.) [6]	Класс	<b>Специальное</b>	<b>Социальное</b>	<b>Массовое</b>		<b>Престижное</b>	<b>Высококомфортное</b>	
	Норма жил. обеспечен.	квартира	200 чел./га	18 м <sup>2</sup> общей площ.	22 м <sup>2</sup> общей площ./чел.		30 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	90 м <sup>2</sup> общей площ./чел.
		дом	–	60–90 м <sup>2</sup> общей площ.	от 70 м <sup>2</sup> до 110 м <sup>2</sup> общей площ./чел.		от 90 до 180 м <sup>2</sup> общей площ.	от 180 до 360 м <sup>2</sup> общей площ.
	Тип жилища	квартира	гостиничный	–	многоэтажный		многоэтажный	многоэтажный жилой комплекс
дом		блокированный	блокированный	блокированный		индивид. дом, блокирован.	индивидуальный жилой дом	
Г.У. Козачун, Н.А. Лапко (2011 г.) [4]	Класс	<b>1-я группа (малоимущие)</b>			<b>2-я группа (средний класс)</b>		<b>3-я группа (высокий уровень дохода)</b>	
	Основной тип жилища	Типовые серийные дома, квартиры улучшенной планировки			Квартиры улучшенной планировки и коттеджи с квартирами свободной планировки		Элитные жилые дома и особняки	

Окончание таблицы

Исследователи	Критерии	Социально-имущественный класс потребителя		
		Низкий и потенциально средний, 80–85 %	Средний, 10–19 %	Высший, до 4 %
	По уровню комфорта	Социальное жилье	Высокий уровень комфорта	Повышенный комфорт
	По составу помещений	Жилища с ограниченным составом	Квартиры и жилые дома с расширенным составом помещений	С развитым составом помещ.
Нормативы ГППГОиШРО (2012 г.)	По уровню комфорта	<b>Социальный</b> (муниципальное жилище) (60–30 %)	Массовый (экономкласс) (25–50 %)	Престижный (бизнес-класс) (10–15 %)
	Норма жил. обес.	20 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	30 м <sup>2</sup> общей площ./чел.	40 м <sup>2</sup> общей площ./чел.
	Формула заселения	$k = n - 1$ $k = n$	$k = n$ $k = n + 1$	$k = n + 1$ $k = n + 2$

Примечание. Цветом выделены ячейки, относящиеся к коммерческому жилищу.

Анализ таблицы показывает, что во всех концепциях заложена связь между жилищной обеспеченностью, архитектурными возможностями и социальным клиентом соответствующего типа жилища. Из данных таблицы также следует, что в классификации коммерческого жилища, как правило, выделяется три основных класса жилища для трех имущественных слоев населения: 1) для потенциально среднего, домохозяйств с умеренными доходами; 2) для среднего класса, домохозяйств со средними и высокими доходами; 3) для высшего класса, социальной элиты. Классы коммерческого жилища дифференцируются в зависимости: от уровня комфорта и стоимости жилища, каче-

ства архитектурно-планировочных решений; величины обеспеченности жилой и общей площади, формулы заселения.

Таким образом, сравнительный анализ концепций классификации рыночного жилища позволяет рекомендовать использовать в типологии коммерческого жилища его деление на три основные группы, отличающиеся уровнем архитектурно-планировочных решений и основным проектным подходом в соответствии с социально-имущественным классом потребителя: 1) **доступное коммерческое жилище** (потенциально средний класс, 70,2 %), приемлемое для семей с умеренными и малыми доходами, в настоящее время является самым массовым видом коммерческого жилища. Основной проектный принцип: получение прибыли за счет минимизации и рационализации пространства, оборудования, затрат, энергии и ресурсов; 2) **комфортабельное коммерческое жилище** (средний класс, 10–19 %), предназначенное для семей со средними и высокими доходами, классическая форма массового коммерческого жилища. Основной проектный принцип: получение прибыли за счет создания высококомфортной жилой среды – квартир, обслуживания, благоустройства и максимально удобных и привлекательных элементов жилища (пространства, оборудования, мебели); 3) **высококачественное коммерческое жилище** (высший класс, до 4 %), предназначенное для представителей социальной элиты, уникальное коммерческое жилище. Основной проектный принцип: получение прибыли за счет создания высокохудожественного жилого пространства с оригинальным и неповторимым образом, уникальности инженерно-технического решения и всех элементов жилища.

Класс коммерческого жилища предъявляет свои требования к жилищу: составу помещений в квартире, на этаже, в доме, к обслуживающей инфраструктуре в радиусе доступности, благоустройству территории. В соответствии с предложенными классами сформулированы основные требования к архитектурным параметрам коммерческого жилища.

1. *Доступное коммерческое жилище* должно иметь 13–15 м<sup>2</sup> жилой и 20–28 м<sup>2</sup> общей площади на человека, формулу заселения  $K = H$ , минимальный уровень комфорта. Архитектурное решение – типовое на основе функционального проектного подхода. Месторасположение – в новых и обжитых спальных районах на окраине города, вдоль улиц и магистралей. Основной тип жилой ячейки – квартира, дополнительные типы жилых ячеек – коттедж, часть коттеджа, блок-квартира. Типы многоквартирных домов – многосекционный, блокированный, коридорный, галерейный с общественным обслуживанием открытого типа и благоустроенной дворовой территорией. Количество квартир в доме – до 100. Типы квартир – 1, 2, 3, 4-комнатные. Уровень технического оборудования – средний; технические и конструктивные решения используют стандартные технологии, методы возведения, конструкции и материалы.

2. *Комфортабельное коммерческое жилище* должно иметь 28–32 м<sup>2</sup> общей площади на человека, формулу заселения  $K = H + 1$ , средний уровень комфорта. Архитектурное решение – индивидуальное на основе средового подхода. Месторасположение – в новых и обжитых районах города с развитой инфраструктурой, внутриквартально. Основной тип жилой ячейки – блок-квартира, дополнительные – квартира, студия, дом-особняк. Дома – блокиро-

ванных, секционный, коридорный с квартирами-дуплексами и смешанной структуры – с общественным обслуживанием открытого и закрытого типа, огороженной благоустроенной дворовой территорией образуют жилой комплекс. Количество квартир – до 50. Типы квартир – студия, 2, 3, 4, 5-комнатные. Уровень технического оборудования – достаточно высокий; применяются современные технологии, методы возведения, конструкции и экологические строительные материалы. Придается большое значение стилю, индивидуализации и оригинальности архитектурного облика.

3. *Высококачественное коммерческое жилище* должно иметь более 32 м<sup>2</sup> общей площади на человека, формулу заселения  $K = H + 3$  и более, максимальный уровень комфорта. Архитектурное решение – уникальное на основе феноменологического подхода. Месторасположение – престижные районы города, пригороды с экологически чистой территорией, удаленной от магистралей и особо развитой инфраструктурой прилегающих территорий и самого жилища. Основной тип жилой ячейки – дом-вилла. Дополнительные типы жилых ячеек – квартира-этаж, пентхаус. Типы домов – вилла, таунхаус, односекционный с количеством квартир до 20. Типы квартир – 4, 5, 6, 7-комнатные и более. Жилые дома с развитой закрытой системой обслуживания и огороженной благоустроенной территорией образуют многофункциональный жилой комплекс (усадебу, виллу, клубный дом). Уровень технического оборудования – очень высокий; используются новейшие технологии, методы возведения, конструкции и экологические строительные материалы. Применение принципов энергоэффективности и энергоактивности зданий, горизонтального и вертикального озеленения, «интеллектуального» оборудования, управляющего внутренними системами жилища.

Формирование архитектуры коммерческого жилища обусловлено, прежде всего, экономическими, социальными и экологическими факторами. К ним относят уровень дохода домохозяйства, который определяет платежеспособный спрос населения; социальную однородность проживающих; энерго- и ресурсоэффективность, экологичность технологий и строительных материалов. Основной принцип формирования коммерческого жилища состоит в извлечении максимальной прибыли за счет продажи квартиры или дома.

Специфика коммерческого жилища, в отличие от доходного, состоит в том, что коммерческое жилище предполагает однородность заселяющихся по доходам и социальному статусу, в то время как в доходном домостроении господствует разнообразие клиентских групп по социально-имущественному статусу. Улучшение качества архитектурных решений коммерческого жилища происходит за счет повышения комфорта проживания, развития общественного (магазины, детсады, комнаты дневного пребывания детей, аптека и т. п.) и технического обслуживания, увеличения общей площади на человека, местоположения в экологически благоприятной среде, эстетической организации придомовой территории и всего жилого пространства.

Таким образом, в современных социально-экономических условиях России для целей проектирования целесообразно дифференцировать коммерческое жилище на три группы: доступного, комфортабельного и высококачественного жилища, отличающиеся типом основной проектной задачи, что

обуславливает планировку, уровень комфорта и качество архитектурных решений. Дифференциация определяется также социально-имущественным классом потребителя и требованиями к архитектурной организации на всех пространственных уровнях жилища (квартира – дом – комплекс).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кайдалова, Е.В.* Архитектурное формирование коммерческих жилых домов в историческом центре города (на примере г. Нижнего Новгорода) : автореф. дис. ... канд. архит. – Нижний Новгород, 2005.
2. *Карташова, К.К.* Формирование архитектурно-планировочной структуры городского жилища на социально-демографической основе : автореф. дис. ... докт. архит. 18.00.02. – М. : МАРХИ, 1985.
3. *Кияненко, К.В.* Архитектура и социальное моделирование жилища : автореф. дис. ... докт. архит. – Вологда, 2005.
4. *Козачун, Г.У.* Современная типология жилых зданий. Часть II / Г.У. Козачун, Н.А. Лапко // Жилищное строительство. – 2011. – № 2. – С. 14–17.
5. *Кутузов, В.В.* Воспроизводство жилья в условиях социально-ориентированной рыночной экономики («Жилье для всех и рынок») / В.В. Кутузов. – М. : ЦНИИЭП жилища, 1994. – 290 с.
6. *Лыжин, С.М.* Архитектура и структура жилищного фонда города (на примере городов Урала) : автореф. дис. ... докт. архит. – М. : МАРХИ, 2006. – 55 с.
7. *Магай, А.А.* Городское жилище на современном этапе / А.А. Магай // Жилищное строительство. – 2003. – № 2. – С. 2–6.
8. *Малева, Т.М.* Социальные страты и социальная политика в современной России. – Условия доступа : [http:// 2003 №1](http://2003№1) <http://spero.socpol.ru> (дата обращения 07.02.2013).
9. *Молчанов, В.М.* Теоретические основы проектирования жилых зданий / В.М. Молчанов. – Ростов-на-Дону : РГАИ, 1999. – 215 с.
10. *Согомонян, Н.М.* Архитектура российского села. Региональный аспект / Н.М. Согомонян. – М. : Российская Академия архитектуры и строительных наук, «Архитектура-С», 2005. – 208 с.

## REFERENCES

1. *Kaidalova, E.V.* Arkhitekturnoe formirovanie kommercheskikh zhilykh domov v istoricheskom tsentre goroda (na primere g. Nizhnego Novgoroda) [Architectural formation of commercial housing in historical city centre of Nizhny Novgorod]. Nizhny Novgorod, 2005. (rus)
2. *Kartashova, K.K.* Formirovanie arkhitekturno-planirovochnoi struktury gorodskogo zhilishcha na sotsial'no-demograficheskoi osnove [Architectural house-planning on a sociodemographic basis]. Moscow : Moscow Architectural Institute (State Academy), 1985. (rus)
3. *Kiyanenka, K.V.* Arkhitektura i sotsial'noe modelirovanie zhilishcha [Architecture and social model of housing]. Vologda, 2005. (rus)
4. *Kozachun, G.U., Lapko, N.A.* Sovremennaya tipologiya zhilykh zdaniy. Chast' II [Modern typology of residential units]. *Housing Construction*. 2011. No. 2. Pp. 14–17. (rus)
5. *Kutuzov, V.V.* Vosproizvodstvo zhilya v usloviyakh sotsial'no-orientirovannoi rynochnoi ekonomiki («Zhil'e dlya vseh i rynek») [Housing reproduction under conditions of socially oriented market economy]. Moscow : TsNIIEP zhilishcha, 1994. 290 p. (rus)
6. *Lyzhin, S.M.* Arkhitektura i struktura zhilishchnogo fonda goroda (na primere gorodov Urals) [Architecture and housing facilities organization of Ural cities]. Moscow : Moscow Architectural Institute (State Academy), 2006. 55 p. (rus)

7. *Magai, A.A.* Gorodskoe zhilishche na sovremennom etape [Municipal housing today]. *Housing Construction*. 2003. No. 2. Pp. 2–6. (rus)
8. *Maleva, T.M.* Sotsial'nye straty i sotsial'naya politika v sovremennoi Rossii [Social strata and policies in modern Russia]. Access conditions : [http:// 2003 №1](http://2003№1) <http://spero.socpol.ru> (date of access : 07.02.2013). (rus)
9. *Molchanov, V.M.* Teoreticheskie osnovy proektirovaniya zhilykh zdaniy [Theoretical principles of housing design]. Rostov-on-Don : RGAI, 1999. 215 p. (rus)
10. *Sogomyan, N.M.* Arkhitektura rossiiskogo sela. Regional'nyi aspekt [Architecture of a Russian village. Regional dimension]. Moscow : The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, «Arkhitektura-S», 2005. 208 p. (rus)

УДК 711.61:72.03

*ПОТАПОВ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ, аспирант,  
alekseypotapov@mail.ua  
Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры,  
49600, г. Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24а*

## **ИСТОРИЧЕСКАЯ ПЕРИОДИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ МНОГОЦЕЛЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Рассматривается история развития планировочной структуры общественных центров городов. Особое внимание уделяется формам организации общественных пространств многоцелевого использования. Определены качественные этапы становления пространственных структур городских центров, выявлен циклический характер эволюционного развития многоцелевых общественных пространств.

**Ключевые слова:** общественное пространство; многоцелевое использование; городской общественный центр; исторические этапы; пространственная структура.

*ALEKSEI E. POTAPOV, Research Assistant,  
alekseypotapov@mail.ua  
Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
24a, Chernyshevskii Str., 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine*

## **HISTORICAL DEVELOPMENT OF MULTI-PURPOSE PUBLIC SPACE**

The paper is devoted to the historical development of town-planning pattern. Special attention is paid to organization forms of multi-purpose public space. Stages of town-planning pattern development of centers are defined in this paper; a cyclic nature of evolution of multi-purpose public space is shown herein.

**Keywords:** public space; multi-purpose use; city public centre; historical stages; town-planning pattern.

Полифункциональная структура современных общественных пространств является необходимой формой их существования в нынешних экономических, политических и градостроительных условиях и наиболее соответствующей всевозрастающему уровню социальных запросов. Общественные пространства, используемые для реализации множества различных коллективных мероприятий, известны еще с древних времен. Историческое развитие городов и их общественных центров, учитывая различные социально-экономические формации, фиксирует качественные этапы между формами и видами использования общественного пространства.

Целью данного исследования является определение качественных этапов развития общественного пространства многоцелевого использования городских общественных центров.

Анализируя историческое формирование городов по пространственно-планировочной структуре городских центров, в их развитии можно выделить шесть качественных этапов: 1-й этап – древние времена (XXII–VI вв. до н. э.), 2-й этап – античный мир (VIII в. до н. э. – IV в. н. э.), 3-й этап – эпоха Средневековья (VI–XVI вв.), 4-й этап – эпоха Возрождения, стиль барокко, классицизм (XV–XIX вв.), 5-й этап – капиталистические города XX в., 6-й этап – современное состояние, градостроительство нач. XXI в. (рис. 1).

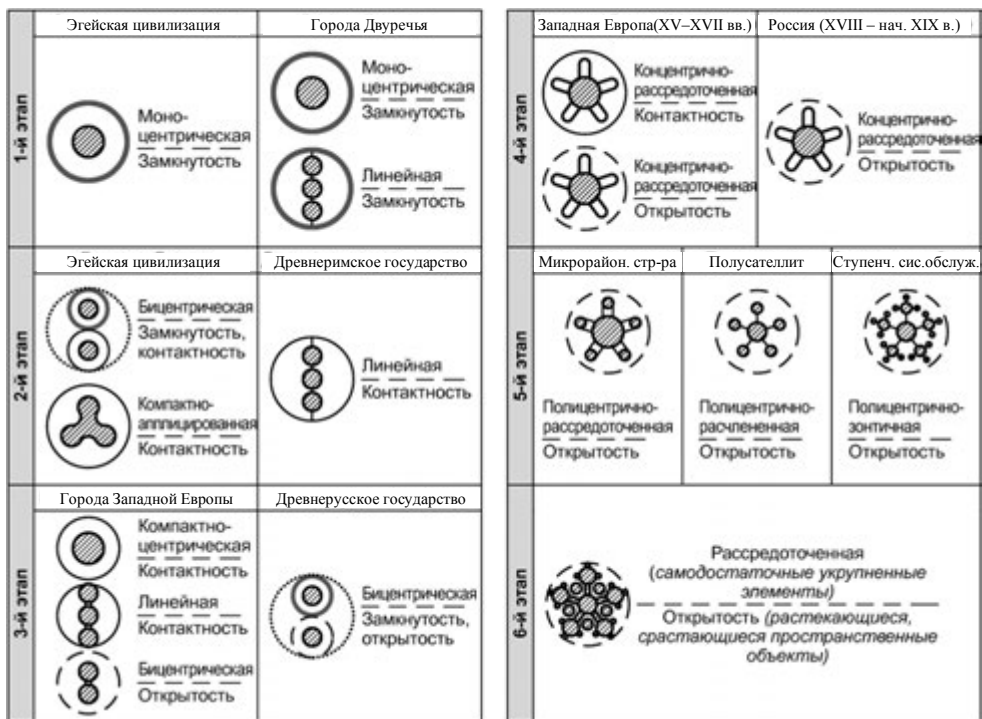


Рис. 1. Пространственно-планировочная организация общественных центров

Указанные этапы основываются на исследованиях всемирной истории градостроительства А.В. Бунина, Т.Ф. Саваренской, Д.О. Швидковского, Ф.А. Петрова, территориально ограничиваются странами Европы и Западной части Азии [2, 3, 5, 6].

**1-й этап** исторического развития общественных центров относится ко времени существования древних цивилизаций и обозначен градостроительством Крито-микенских поселений и городов Двуречья. На данном этапе фиксируется образование первых открытых общественных пространств многоцелевого использования.

Основным структурно-планировочным элементом поселений был дворцовый комплекс, представлявший собой скопление объемов помещений во-

круг одного или нескольких открытых пространств. Незначительный территориальный размер городов и компактная структура дворцов обусловили многоцелевое использование общественного пространства, ставшее единственным принципом его организации и составившее примитивную, синкретическую структуру. Это в определенной степени ограничивало разнообразие общественных мероприятий. Еще одним фактором частичного ограничения в использовании пространства было его физическое расположение в составе дворцовых комплексов, где целевое назначение пространства целиком зависело от стационарно установленных элементов, необходимых для реализации культовых и праздничных процессий.

**2-й этап** определяется градостроительством Древней Греции и Древнеримского государства. Общий культурный подъем в период античности способствовал формированию новых потребностей общества, что, в свою очередь, привело к наполнению городского центра различными общественными объектами. Развитие пространственной структуры общественного центра содействовало расширению его территориального влияния в городской среде, а новое качество коммуникаций обеспечило связность городских территорий.

Если еще в начале эпохи античности в городах Древней Греции пространство акрополя и агоры использовалось для многих общественных целей, то в дальнейшем появились пространственные объекты, каждый из которых был отведен под конкретную задачу. Таким образом, городской центр насыщался общественными пространствами, которые имели фиксированное назначение, и только пространство главной площади, агоры или форума, концентрируя значительное количество общественных зданий, оставалось общим для разного рода целей.

**3-й этап** отмечен определенной степенью упадка в пространственном развитии городов. В силу уплотненной планировки городских территорий, общественные центры Средневековья получили компактную структуру. При таких условиях количество общественных пространств свелось к минимуму, что повлекло за собой возврат к их многоцелевому использованию.

Характерной для эпохи Средневековья было наличие двухчастной пространственно-планировочной структуры общественных центров. Города Западной Европы имели две городские площади, где одна служила для выполнения исключительно культовых целей, а вторая, с приоритетом торговли, имела многоцелевое использование. Общественный центр древнерусских городов включал в себя Кремль, вмещавший группу общественных площадей административного и культового назначения, и большую торговую площадь, которая была жизненным центром посада. Благодаря отсутствию ограничений в доступе, большей связности с системой улиц, чем на других этапах, и другой качественной форме синкретичности структуры общественных пространств, количество решаемых задач, по сравнению с первым этапом, значительно возросло.

**4-й этап** стал ощутимым толчком в планировочном преобразовании и развитии структуры городов и их общественных центров. Градостроитель-

ная деятельность эпохи Ренессанса, впоследствии уступившая место барокко, вместе с российским градостроительством периода становления и расцвета классицизма внесли новое качество в планировочную организацию общественных центров, обозначив их структурно-пространственное расширение.

Данный процесс происходил за счет появления новых функциональных объектов городского центра. Такие структурно-пространственные элементы размещались на периферийных территориях города и были хорошо связаны с историческим центром благодаря системе лучевых магистральных улиц. Этот период фиксирует второй этап пространственного отделения структурных элементов системы городского центра, где на определенном расстоянии от исторически сложившейся группы пространств многоцелевого использования образовывались новые пространственные объекты, расширяя территориальный диаметр городского центра. Они имели определенную фиксированную функциональную принадлежность, составляя моно- или бифункциональные пространства.

*5-й этап* с установлением капиталистической экономики и индустриального способа производства определился как следующий качественный этап развития городов. Территориальный рост, концентрация промышленности и удлинение коммуникаций обусловили усложнение общей планировочной структуры городов, что непосредственно повлияло на пространственную организацию общественных центров. Планировочно развитые структуры городов образовывали систему общественных центров, элементы которой получили иерархическое соподчинение в соответствии с теми системами, которые применялись в практике градостроительства того времени.

Коренная перепланировка крупных городов началась с внедрения микрорайонной структуры в 30-х гг., которую разработали Томас Адамс и Кларенс Артур Перри. Таким образом, наряду с общегородским общественным центром возникла равномерная последовательная система подцентров города, каждый из которых вмещал установленный набор общественных функций.

Еще одним шагом в направлении децентрализации городов было внедрение идеи полуавтономного городского района, которую предложил Элиэль Сааринен. Развитые общественные центры таких городских районов, в силу удлинения коммуникаций возросших капиталистических городов, приближали жизненно необходимые общественные функции в удаленные от общегородского центра селитебные территории [4].

Возникновение ступенчатой системы обслуживания в 60-х гг. стало следующим этапом преобразований общей планировочной структуры многих городов. Сущность системы заключалась в создании разветвленной и последовательной сети учреждений, предназначенных для рационализации воспитания, быта, труда и отдыха населения. Каждая ступень обслуживания соответствует структуре городской застройки: повседневное обслуживание сосредоточивается в микрорайоне, периодическое – в жилом районе, эпизодическое имеет общегородское значение [1].

Процесс пространственного распределения общественных центров по их иерархическому уровню определял содержание фиксированного состава общественных функций. Таким образом, пространственные объекты, которые отводились под решение различных общественных задач, располагались исключительно на территории ядра общегородского общественного центра.

**6-й этап** характеризуется организацией пространственной структуры современных городских центров, основывающейся на тех же системах, что и в прошлом веке. Однако тенденция к концентрации общественных функций, изменение их качественных и количественных характеристик, приобретение определенной степени самодостаточности каждого из элементов существующих систем – все это привело к их деформации.

Изменение параметров общественных функций и появление возможности их мобильного устройства вызвали необходимость в организации пространств многоцелевого назначения нового качества. Пространственные объекты, которые приобретают такую функциональную насыщенность, не только распространяются по центральной части города, но и образуются на удаленных территориях от общегородского центра, в жилых районах и периферийных территориях города.

Пространственное ограничение или закрепление общественных функций, присущее предыдущим этапам развития общественных центров, на современном этапе заменяется более динамичным, мобильным их устройством. Таким образом, системы общественных центров приобретают функционально-пульсирующий характер, где временные функции имеют способность распространяться, разворачиваться и сворачиваться составом своих планировочных элементов в их пространственной структуре.

Обобщая историческую периодизацию формирования общественных центров городов, следует отметить циклический характер эволюционного развития общественных пространств многоцелевого использования (рис. 2). Выделяется 3 качественных уровня в преобразовании их структуры:

1-й уровень – синкретическое построение пространства, где виды общественных мероприятий ограничивались количеством их возможного устройства, а организация предусматривала замещение одного назначения другим;

2-й уровень – возвращение многоцелевого использования в форме апплицированной синкретики с фиксированным характером общественных мероприятий, которое произошло после этапа частичного пространственного расщепления общественных функций;

3-й уровень – современная полифункциональная структура общественного пространства, без наличия пространственного закрепления функций, приобрела более мобильную, динамическую составляющую в устройстве общественных мероприятий, которая реализуется в сложившейся территориально рассредоточенной системе общественных центров.

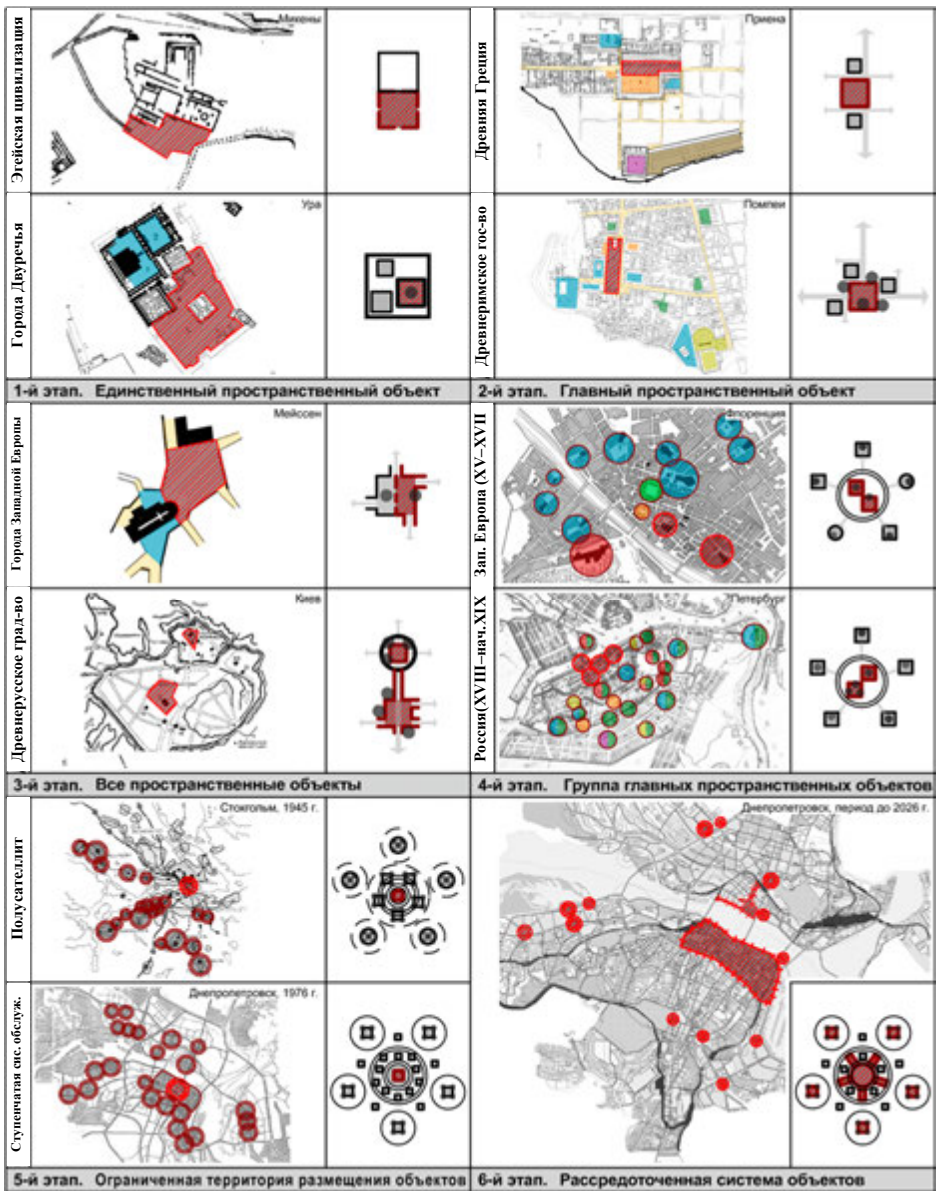


Рис. 2. Этапы развития территориального устройства и форм организации общественных пространств многоцелевого использования:

■ – пространство многоцелевого использования; ■ (с красной обводкой) – территория общегородского центра с содержанием многоцелевых пространственных объектов; ● (красный) – территория общественного использования с содержанием многоцелевых пространственных объектов; ● (серый) – территория общественного использования с содержанием пространственных объектов фиксированного назначения; ■ (красный) – пространство многоцелевого использования; ■ (серый) – пространство с фиксированным назначением; □ – изолированный пространственный комплекс; ● (серый) – объекты, связанные с назначением общественного пространства

## Выводы

Сравнивая структурную организацию общественных центров в установленной 3-уровневой системе качественного преобразования пространств многоцелевого использования, на разных этапах их образования и развития фиксируются следующие закономерности:

1. Многоцелевое использование пространства на ранних этапах развития городов было непосредственно связано с ограничением реализации общественных мероприятий ввиду незначительного территориального размера общественного центра. Их компактная структура определяла ограниченное количество общественных пространств, а наряду с тяготением общественных объектов предопределяла интенсификацию их использования (этапы 1, 3).

2. Как только общественный центр получал территориальное расширение, его пространственная структура усложнялась, растущий территориальный диаметр заполнялся дополнительными пространственными объектами, которые отделялись от ядра общегородского центра и распространялись в городской структуре. Этот процесс сопровождался отведением создаваемым пространственным объектам фиксированной функциональной принадлежности. Таким образом, многоцелевое назначение оставалось только в главных пространственных объектах города, и часть существования таких объектов от общего их количества сводилась к минимуму (этапы 2, 4, 5).

3. Только достигнув современного состояния, когда сформированные, территориально рассредоточенные системы общественных центров приобрели значительную функциональную насыщенность, возникла необходимость в существовании общественного пространства многоцелевого использования нового формата. Впервые в истории развития общественных центров на стадии их усложненной планировочной структуры фиксируется возвращение полифункциональности общественных пространств, которые распространяются не только по центральной части города в виде локальных сгустков общественной активности, но и возникают на его отдаленных территориях (этап 6).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Авдотын, Л.Н.* Градостроительное проектирование / Л.Н. Авдотын, И.Г. Лежава, И.М. Смоляр. – М. : Стройиздат, 1989. – 432 с.
2. *Бунин, А.В.* История градостроительного искусства. Градостроительство рабовладельческого строя и феодализма. Том первый / А.В. Бунин, Т.Ф. Саваренская. – М. : Стройиздат, 1979. – 496 с.
3. *Бунин, А.В.* История градостроительного искусства. Градостроительство XX века в странах капиталистического мира. Том второй / А.В. Бунин, Т.Ф. Саваренская. – М. : Стройиздат, 1979. – 415 с.
4. *Иконников, А.В.* Современная архитектура Швеции / А.В. Иконников. – М. : Стройиздат, 1978. – 151 с.
5. *Саваренская, Т.Ф.* История градостроительного искусства. Рабовладельческий и феодальный периоды / Т.Ф. Саваренская. – М. : Стройиздат, 1984. – 376 с.
6. *Саваренская, Т.Ф.* История градостроительного искусства. Поздний феодализм и капитализм / Т.Ф. Саваренская, Д.О. Швидковский, Ф.А. Петров. – М. : Стройиздат, 1989. – 391 с.

## REFERENCES

1. *Avdot'in, L.N., Lezhava, I.G., Smolyar, I.M.* Gradostroitel'noe proektirovanie [Urban planning]. Moscow : Stroyizdat, 1989. 432 p. (rus)
2. *Bunin, A.V., Savarenskaya, T.F.* Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. Gradostroitel'stvo rabovladel'cheskogo stroya i feodalizma [History of urban art. Urban planning in slave-owning system and feudalism]. Moscow : Stroyizdat, 1979. V. 1. 496 p. (rus)
3. *Bunin, A.V., Savarenskaya, T.F.* Istorija gradostroitel'nogo iskusstva. Gradostroitel'stvo XX veka v stranah kapitalisticheskogo mira [History of urban art. Urban planning in the 20<sup>th</sup> century in the market system]. Moscow : Stroyizdat, 1979. V. 2. 415 p. (rus)
4. *Ikonnikov, A.V.* Sovremennaya arkhitektura Shvetsii [Modern architecture of Sweden]. Moscow : Stroyizdat, 1978. 151 p. (rus)
5. *Savarenskaya, T.F.* Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. Rabovladel'cheskii i feodal'nyi periody [History of urban art. Slave-owning and feudal periods]. Moscow : Stroyizdat, 1984. 376 p. (rus)
6. *Savarenskaya, T.F., Shvidkovskii, D.O., Petrov, F.A.* Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. Pozdnij feodalizm i kapitalizm [History of urban art. Late feudalism and capitalism]. Moscow : Stroyizdat, 1989. 391 p. (rus)

УДК 628.971.6

*ОВЧАРОВ АЛЕКСАНДР ТИМОФЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
oat\_08@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **СВЕТОДИОДНАЯ СВЕТОТЕХНИКА В НАРУЖНОМ ОСВЕЩЕНИИ Г. ТОМСКА**

В статье на примере обследования установок наружного освещения г. Томска дан сравнительный анализ традиционной и светодиодной светотехники по основным показателям. Выявлено, что в этой области светодиодная светотехника в настоящий момент не конкурентоспособна. Приведены результаты измерений параметров установок. Показано, что реконструкция сетей наружного освещения методом прямой замены ламповых светильников светодиодными является нерациональной. Приведена технико-экономическая оценка мероприятий по реконструкции сетей наружного освещения.

**Ключевые слова:** наружное освещение; безопасность; светодиодная светотехника; ламповая светотехника; световая среда; яркость; освещенность; распределение освещенности; световая эффективность; системы автоматического управления.

*ALEKSANDR T. OVCHAROV, DSc, Professor,*

*oat\_08@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **LIGHT-EMITTING DIODE STREET LIGHTING IN TOMSK**

The paper presents a comparative analysis of principal parameters of traditional and light-emitting diode (LED) lighting in the Tomsk-city. It is shown that LED lighting is currently noncompetitive in this field of application. Results of measurements made for streetlight parameters are given in this paper. Also, it is shown that a directional replacement of traditional lamps by LED lighting is inefficient. A feasibility study for reconstruction of street lighting networks is given herein.

**Key words:** outdoor illumination; safety; light-emitting diodes; traditional lighting; light environment; brightness; illumination; illumination intensity; luminous efficacy; automatic control systems.

История наружного освещения (НО) преломляется через его главное предназначение – безопасность, которая во все времена являлась приоритетной государственной задачей. Мировая практика подтверждает, что качественное НО снижает общее количество ДТП в среднем на 30 % [1]. По статистике на тёмное время суток приходится почти половина всех ДТП с тяжёлыми последствиями. Аварийность увеличивается из-за ослабления контроля над транспортным движением. Отсюда столь пристальное внимание к качеству НО в нормативных документах [2].

Обострившиеся проблемы экологического порядка ставят перед мировым сообществом задачи глобального энергосбережения. Эти обстоятельства вы-

ступают стимулами развития энергоэффективной осветительной техники, в частности, нового перспективного направления – светодиодной светотехники (ССТ), которую можно назвать техникой нового поколения. Интегральный потенциал энергосбережения от использования ССТ в сетях общего освещения превышает 60 % и растет в связи с непрерывным прогрессом в совершенствовании конструкций, улучшении качественных характеристик световой среды (СС) и увеличении энергетической эффективности. Перспективность использования ССТ в значительной степени обусловлена непрерывными и синхронными тенденциями снижения её стоимости и роста световой отдачи (рис. 1).

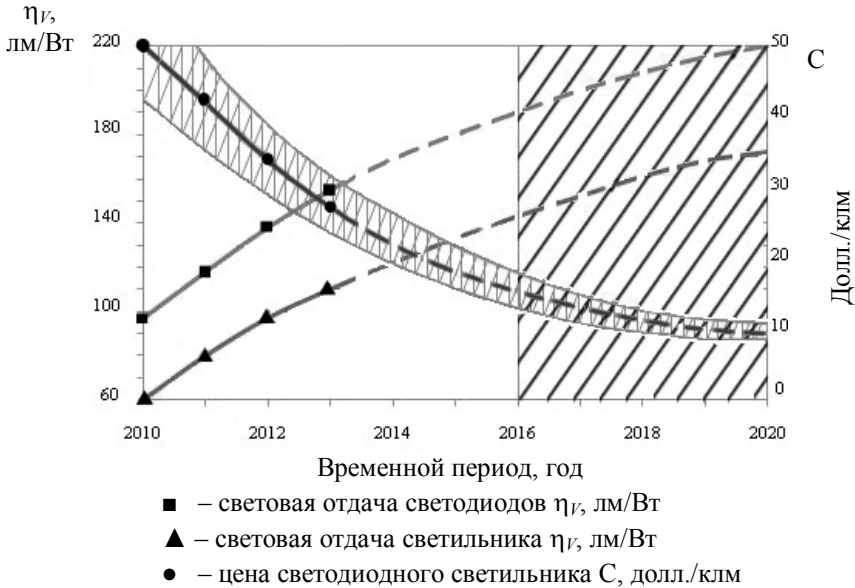


Рис. 1. Динамика роста световой отдачи  $\eta_v$  и снижения цены ССТ (график объединяет периоды фактических параметров и прогнозируемых на перспективу по данным периодической печати). Заштрихованная часть графика – период предпочтительного применения. Пунктирные линии – прогноз

В контексте многообещающих перспектив актуален анализ обоснованности широкого внедрения ССТ в системы общего освещения, в частности, в сети НО городов. Интенсивное развитие производства ССТ побуждает производителей и поставщиков предпринимать активные попытки её внедрения в осветительные сети. В качестве основных преимуществ светодиодных светильников (СДС) для указанных целей позиционируются энергетическая эффективность, большой срок службы и высокое качество цветопередачи. Параметры ССТ, как правило, рекламируются с большим опережением реально достигнутого уровня, и резонно возникает вопрос об их объективности.

Основная функция установок НО (УНО) – комфортные условия для зрительной работы участников дорожного движения: водителей и пешеходов. Комплекс нормируемых количественных и качественных характеристик УНО – яркость (освещенность) дорожного покрытия, равномерность распределения освещенности, параметр TI (параметр слепящего действия) – форми-

рует СС с высоким уровнем видимости, различимости, контрастности и минимальным дискомфортом, которые обеспечивают безопасность на дорогах [2]. С позиций указанных критериев выполнен анализ УНО и оценена техническая и экономическая обоснованность мероприятий по реконструкции наружных осветительных сетей г. Томска.

При оценке технико-экономического обоснования (ТЭО) инвестиций не менее важно принять во внимание динамику изменения технических параметров и цены изделий в масштабе реального времени. В период интенсивного роста световой отдачи (особенно на фоне конкурентоспособности ламповой светотехники) и одновременного снижения цены ССТ может сложиться ситуация, при которой УНО после реконструкции морально устареет значительно раньше, чем завершится срок окупаемости. При таких обстоятельствах большой срок службы ( $\tau \geq 50\,000$  ч) как преимущество теряет свою привлекательность, и целесообразность инвестиций в реконструкцию можно подвергнуть сомнению. Очевидно, что наибольший технический и экономический эффект от реконструкции достигается на временном этапе стабилизации световой эффективности на максимальном уровне (по крайней мере, на уровне явного превосходства над ламповой техникой), а цены – на минимальном (например, на уровне лучших образцов ламповой техники).

По прогнозам развития технологии, материаловедения, конструкторских решений СДС и качества создаваемой световой среды этот период наступит предположительно с 2016 по 2020 гг. (рис. 1), когда во всех сферах освещения ССТ займет лидирующее положение и можно ожидать, что все утилитарное освещение будет светодиодным. В этот период ССТ не только превзойдет по энергетической эффективности традиционную ламповую технику, но и преодолет характерные для настоящего времени недостатки: нестабильность светового потока, малые полезный срок службы, надежность и долговечность. Кроме того, рынок ССТ к предполагаемому времени должен отрегулировать уровень качества изделий и решить вопросы сертификации, стандартизации и метрологии, отфильтровав низкопробную продукцию отечественного и иностранного производства, и стабилизироваться на высоком уровне качества [3].

В табл. 1 для сравнения приведены некоторые характеристики современных разрядных ламп высокого давления (ВД) (металлогалогенные – МГЛВД и натриевые – НЛВД) и светильников на их основе с электронными пускорегулирующими аппаратами, индукционных ламп (ИЛ) и светильников (ИнС) и светодиодных светильников (СДС) для НО.

Сопоставительный технико-экономический анализ традиционной ламповой техники и современной ССТ для сетей НО на текущий период не подтверждает активного оптимизма сторонников светодиодного освещения. По техническим и стоимостным параметрам СДС не является безоговорочной альтернативой ламповой технике для НО. При анализе использованы показатели: энергетическая эффективность (световая отдача), надежность и долговечность (полезный срок службы, стабильность световых и цветовых характеристик в процессе эксплуатации), качество создаваемой световой среды и цена изделия. Энергетическая эффективность светильников с современными

разрядными лампами, как правило, выше, чем у СДС, а цены значительно ниже, что обуславливает ТЭО ее предпочтительного использования в сетях НО [9, 10]. Такое заключение поддерживается ведущими специалистами в области светотехники [11]. Говоря о перспективах, можно предположить, что ССТ будет доминировать с момента, когда световая отдача СДС превысит 150 лм/Вт при удельной стоимости около 10–12 долл./кЛм.

Таблица 1

Некоторые характеристики светильников<sup>7)</sup> для НО

Светильники по типу источников света	Световая отдача светильников (лампы), лм/Вт	Срок службы, тыс. ч	Диапазон мощности, Вт	$\Delta\Phi_v/\Phi_v^{(1)}$ , %	Удельная цена, долл./кЛм	$R_a$
ЖКУ (НЛВД)	70–128 (95–140)	28–55 <sup>2)</sup>	70–400	15–20	3–7	23–40
РКУ (МГЛВД <sup>4)</sup> )	65–95 (85–120)	12–20, 40 <sup>2)</sup>	70–400	15–20	4–9	≥ 80
ИнС <sup>5)</sup> (ИЛ)	70–85 (80–110)	50	40–400	10–15	20–27 <sup>3)</sup>	≥ 80
СДС	60–90	30–50 <sup>6)</sup>	50–200	20–60	27–42 <sup>3)</sup>	≥ 80

<sup>1)</sup> Снижение светового потока лампы после 10 тыс. ч горения.

<sup>2)</sup> Лампа с двумя горелками.

<sup>3)</sup> Приблизительная цена светильника со световым потоком в диапазоне 10–20 кЛм.

<sup>4)</sup> Лампы с керамической горелкой.

<sup>5)</sup> ИнС – индукционный светильник.

<sup>6)</sup> Предполагаемые значения.

<sup>7)</sup> В таблице приведены параметры ламп и светильников, заимствованные из каталогов ведущих светотехнических фирм (Philips, Osram) и отечественной светотехнической компании ООО «Рефлекс», производителей индукционных ламп и светильников [4, 5] и публикаций обзорного характера [6, 7, 8].

Среди проблем ССТ сегодняшнего дня следует указать:

– нестабильность ввиду быстрой деградации световых и цветовых параметров (малый полезный срок службы, который оценивается по снижению светового потока на 30 %; для большинства СДС отечественного и зарубежного производства полезный срок службы не превышает 10–20 тыс. ч; этот недостаток является технической проблемой, вполне устранимой в ближайшем будущем);

– малую надежность СДС в жестких климатических условиях эксплуатации (большие перепады температуры и влажности), несоответствие заявленных значений степени защиты от воздействия окружающей среды (показатель IP), порожденное несовершенством конструктивных решений, не обеспечивающих оптимальный теплообмен, вентиляцию и герметичность;

– отсутствие стандартов и метрологического обеспечения;

– неизученность параметров световой среды.

С позиций вышеизложенного приводятся результаты обследования УНО г. Томска: ул. Нахимова и Елизаровых, на которых проведена реконструкция путем прямой замены ламповых (НЛВД) светильников светодиодными, и ул. Пушкина, на которой выполнена капитальная реконструкция проезжей части и построена новая УНО с СДС. Указанные улицы в соответствии с классификацией [2] относятся к категории Б1, для которых средняя горизонтальная освещенность покрытия нормируется на минимальном уровне 20 лк с учетом коэффициента запаса  $K_3 = 1,6$ , соответственно, 32 лк. Результаты измерений параметров УНО приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Параметры УНО до и после реконструкции

Параметры	Нормативные требования <sup>1)</sup>	УНО ул. Нахимова			УНО ул. Елизаровых		УНО ул. Пушкина
		до**	после	проект	до**	после	*
$E_{cp}^{2)}$ , лк	32	37	30	32	23	19	19
$E_{min}/E_{max}^{4)}$	$\geq 0,6$	0,06	0,02	0,7	0,06	0,1	0,2
$E_{min}/E_{cp}$	$\geq 0,4$	0,1	0,1	0,8	0,2	0,3	0,4
$TI$ , %	$\leq 10$	***	41	10	***	11	11
Мощность светильника, Вт	–	183	161 (170) <sup>3)</sup>	150	305	234 (400) <sup>3)</sup>	234 (400) <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> СП 52.13330.2011.

<sup>2)</sup> Значения  $E_{cp}$  приведены с учетом коэффициента запаса  $K_3 = 1,6$ , т. к. измерения проведены вскоре после ввода УНО в эксплуатацию.

<sup>3)</sup> Мощность светильника, соответствующая нормативной освещенности.

<sup>4)</sup> Приведены данные измерений освещенности вместо приоритетной и рекомендованной яркости [2] ввиду значительных отступлений качества дорожного покрытия от требований ГОСТ и различия покрытий проезжей части обследуемых улиц.

\*УНО ул. Пушкина введена в эксплуатацию в 2011 г.

\*\*Параметры УНО до реконструкции заимствованы из отчета по энергетическому обследованию УМП «Томскгорсвет», выполненного в 1997 г. под руководством автора настоящей статьи.

\*\*\*Значения параметра  $TI$  отсутствуют, т. к. ранее измерения не проводились.

**Улица Нахимова**, категория Б1. Ширина дорожного полотна 22 м по три полосы движения в каждом направлении. Особенность улицы в примыкании к проезжей части по обеим сторонам высоковольтных воздушных линий напряжением 35 кВ, что явилось причиной установки низких осветительных опор. УНО односторонняя, шаг опор варьируется от 23 до 27 м, высота установки светильников  $\approx 5,5$  м, угол наклона консоли  $\approx 45^\circ$ , на консолях установлены по два СДС мощностью 162 Вт каждый. УНО построена с грубыми нарушениями стандартов и нормативов: высота опор не удовлетворяет требованиям [2, табл. 12], угол наклона консоли в  $45^\circ$  превышает регламентируемый стандартами угол в  $15^\circ$  [12], неравномерность шага опор вносит дополнительную

неоднородность в распределение освещённости (яркости) дорожного полотна. Большой угол консоли при малой высоте светильника создает слепящий эффект (см. значения  $TI$  табл. 2), поскольку защитный угол как таковой отсутствует.

Улица Нахимова является наиболее проблемной, поскольку еще до реконструкции УНО не удовлетворяла ни одному нормативному требованию. В этой связи выполненная реконструкция путем прямой замены ламповых светильников светодиодными не представляется рациональным решением. Световое поле характеризуется недостаточным уровнем и чрезмерной неоднородностью распределения освещенности вдоль и поперек проезжей части (рис. 3, 4, а), чередованием поперечных темных и светлых полос, резким продольным и поперечным градиентом освещенности по полосам движения транспорта. Например, в зоне, прилегающей к светильникам,  $E_{\max} > 150$  лк, в то время как на противоположной полосе  $E_{\max} \leq 4$  лк. Реконструкция не решила проблемных вопросов освещения улицы.

В результате при движении автомобиля по полосе со стороны осветительных опор в салоне возникают частые яркие вспышки, сопровождаемые ослеплением и потерей водителем контроля над дорогой. Кратность соотношения вертикальной освещенности (освещенность на сетчатке глаза водителя) при прохождении участка дороги между опорами превышает 14. Глаз водителя в условиях периодических пульсаций слепящей яркости и высокой неоднородности распределения яркости полотна дороги работает в неблагоприятном режиме временного ослепления, резких яркостных контрастов в поле зрения и частой переадаптации, снижающей важнейшие для водителя зрительные функции: видимость, различимость, контрастность, чувствительность и реакцию на ситуацию (время восприятия). Такой режим работы создает предпосылки возникновения ДТП, т. к. адаптация глаза при кратности соотношения яркостей в поле зрения более 10 (табл. 2) становится процессом инерционным, при котором надежное различение и опознание предметов становится затруднительным. Инерционность переадаптации обусловлена физиологическими особенностями нервных и фотохимических процессов, перестройкой рецептивных полей в сетчатке глаза, зрачковым рефлексом. Проблемы водителя при движении автомобиля возникают с того момента, когда времени на переадаптацию недостаточно. При движении автомобиля по ул. Нахимова процесс переадаптации периодический и происходит дважды на участке между опорами (через 11–13 м), при этом глаз водителя дважды испытывает адаптацию во взаимно противоположных режимах: «световой» (быстрый) – «темновой» (медленный). Такой режим резко снижает работоспособность и видимость глаза и кратно (в 2 и более раз) увеличивает время реакции водителя на аварийную ситуацию (до 3 с и более). Таким образом, безопасное движение возможно при небольших скоростях (20–30 км/ч), обеспечивающих необходимое время реакции на ситуацию на дороге.

Время реакции зависит от характеристик освещения, в частности, от качества цветопередачи источника света (ИС). Белый свет (МГ ЛВД) обеспечивает наименьшее время реакции, желтый свет (НЛВД) – наибольшее (рис. 2) [13, 14]. Эти данные говорят о предпочтении светодиодного освещения для НО. Однако они служат основой для выбора содержания реконструкции, но

не снижения уровня освещенности дорожного полотна, что неизбежно создает условия с пониженной различимостью и видимостью как предпосылки ДТП, вступая в конфликт с главной задачей НО – обеспечением безопасности. Тем более, что преимущество ССТ в отношении цветопередачи нивелируется при учете особенностей зрения участников движения (водителей и пешеходов) старших возрастных групп [14, 15]. Несомненно, в ближайшем будущем, ее решение за СДС, но это должно достигаться путем повышения качества СС. Необоснованно использовать преимущество ССТ в отношении качества цветопередачи для снижения нормативных требований. Стоит помнить, что речь идет не столько об энергосбережении, сколько о жизни и безопасности человека. При постоянном росте интенсивности движения и парка автомобилей, угрожающем увеличении числа ДТП с тяжелыми последствиями нормативные требования к качеству освещения дорог должны постоянно расти. Увеличение яркости дорожного покрытия в 2 раза снижает количество ДТП в целом на 28 %, с летальным исходом – на 45 %, с пешеходами – на 68 % [13, 14]. Эти данные подтверждаются выводами МКО, обобщающими мировой опыт о взаимосвязи качества НО и аварийности на дорогах.

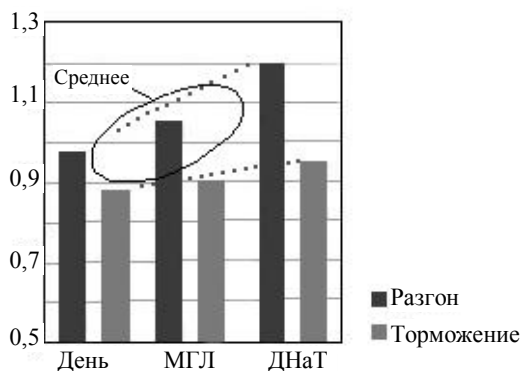


Рис. 2. Разница в скорости реакции водителей в зависимости от типа источника света [13]

Результаты измерений демонстрируют несоответствие УНО после реконструкции нормативным требованиям [2] по всем регламентируемым параметрам освещения проезжей части улицы. По состоянию УНО можно признать ул. Нахимова непригодной для нормальной эксплуатации в ночное время.

При решении задач безопасности на автодорогах проблемы целесообразно решать комплексно, повышая одновременно качество освещения и характеристики (качество и состав) дорожного покрытия. Последний фактор существенен для соблюдения требований по нормированию яркости.

Очевидно, что УНО нуждается в радикальной реконструкции, и, пожалуй, единственным вариантом рационального устройства может быть организация освещения по двухрядной схеме расположения светильников по оси улицы (на разделительной полосе проезжей части) при одновременном увеличении высоты и шага опор. Такая схема организации освещения улицы обеспечит равномерное распределение освещенности по всем полосам движения

и соответствие нормативным требованиям, устраняя практически все недостатки действующей УНО (рис. 4, табл. 3). При моделировании УНО задана КСС светильника, показанная на рис. 5.

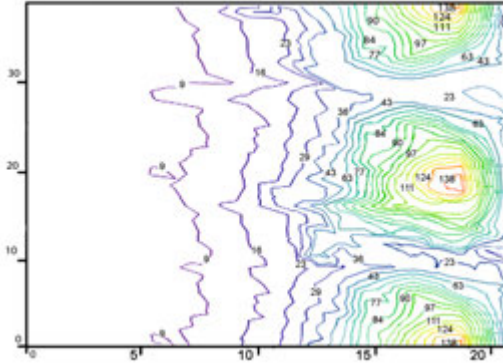


Рис. 3. Распределение освещенности на проезжей части ул. Нахимова

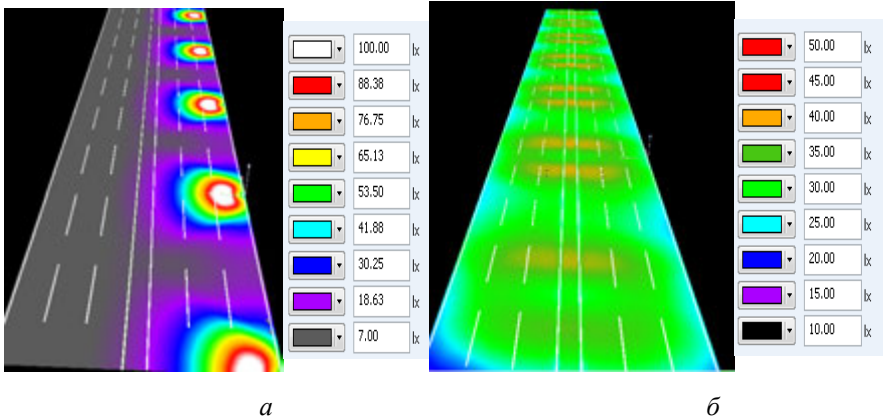


Рис. 4. Распределение горизонтальной освещенности по проезжей части ул. Нахимова: *а* – существующий вариант (после компьютерной обработки результатов изменений); *б* – проектный вариант (компьютерная модель)

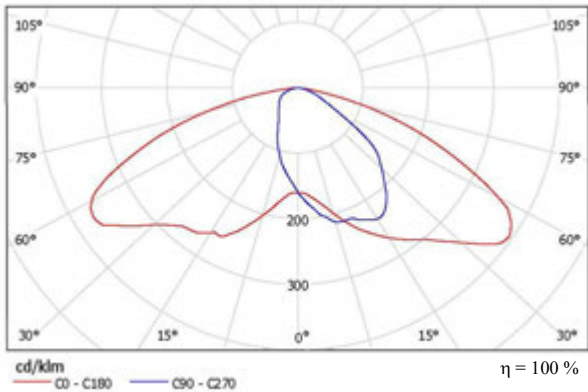


Рис. 5. Кривая силы света (КСС) светильника, использованная при моделировании УНО ул. Нахимова

Улица **Елизаровых**, категория Б1. Ширина дорожного полотна 15 м по две полосы движения в каждом направлении. УНО построена по односторонней схеме, опоры расположены по одну сторону дороги с шагом 30 м, высота установки светильников 9 м, угол наклона консоли  $\approx 15^\circ$ , на консоли установлен СДС мощностью 234 Вт. Показатели УНО приведены в табл. 2, характер распределения освещенности – на рис. 6, а.

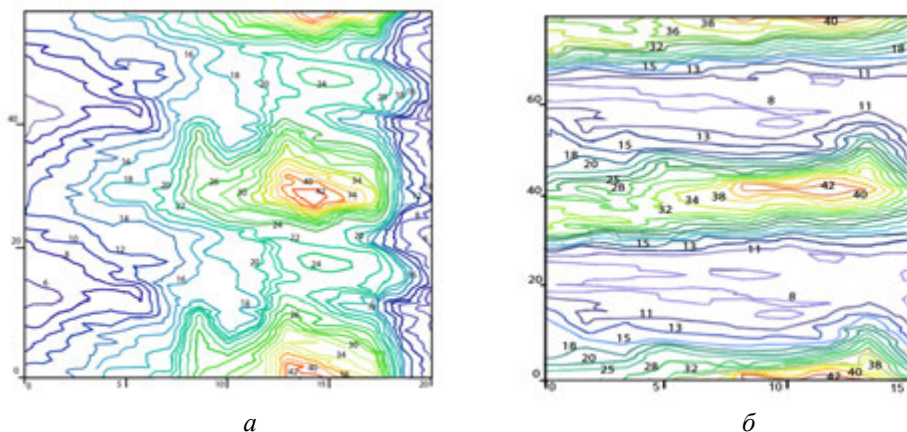


Рис. 6. Распределение горизонтальной освещенности на проезжей части ул. Елизаровых (а) и ул. Пушкина (б)

Таблица 3

**Параметры проезжей части и УНО ул. Нахимова (проект)**

Ширина, м	23,5 (11 + 11 + 1,5)
Число полос движения	6 (3 + 3)
Ширина разделительной полосы, м	1,5
Шаг опор, м	40
Высота установки светильника, м	14
Угол наклона консоли, град	7
Длина консоли, м	2,5
Угол между консолями, град	30
Количество светильников на опоре (четырёхрожковая консоль), шт.	4
Общая мощность светильников, Вт	600
Мощность одного светильника, Вт	150
Световая отдача светильника, лм/Вт;	165
Световой поток одного светильника, лм	24 500
Общий световой поток осветительной системы, лм	98 000
$E_{\text{ср}}$ , лк	32*
$E_{\text{min}}/E_{\text{ср}}$	0,8
$L_{\text{min}}/L_{\text{max}}$	0,7
ТИ, %	$\leq 10$

\*С учетом коэффициента запаса.

**Улица Пушкина**, категория Б1. Ширина дорожного полотна 20 м по две полосы движения в каждом направлении. УНО построена по двухрядной прямоугольной схеме, опоры расположены по обеим сторонам дороги с шагом 40 м, высота установки светильников 11 м, угол наклона консоли  $\approx 15^\circ$ , на консоли установлен СДС мощностью 234 Вт. Показатели УНО приведены в табл. 2, характер распределения освещенности – на рис. 6, б.

В обоих случаях наблюдается общий недостаток УНО: горизонтальная освещенность  $E_{cp}$  ниже нормы ввиду заниженной мощности светильника, уровень продольной неравномерности освещенности завышенный. Для приведения  $E_{cp}$  к норме необходимо увеличить мощность светильника до 400 Вт. Для устранения неравномерности полезно выбрать светильник с широкой КСС.

Краткие технико-экономические показатели мероприятий по реконструкции УНО приведены в табл. 4. В качестве индикатора экономической эффективности мероприятий принят срок окупаемости. Исходя из постулата, что концепция «энергоэффективность» бессмысленна, если УНО не обеспечивает выполнения нормативных требований, формирующих условия для благоприятной зрительной работы и максимальной безопасности, при оценке экономической целесообразности параметры УНО приведены к мощности, при которой удовлетворяются нормативные требования. Энергосберегающий эффект и окупаемость инвестиций на реконструкцию не достигаются. Из данных табл. 4 не просматривается ни техническое, ни экономическое обоснование проведенных мероприятий по реконструкции УНО.

В части качества СС в проектах реконструкции УНО ул. Елизаровых и ул. Пушкина, вероятно, допущены ошибки при выборе КСС и расчете мощности светильников.

Выборочные обследования других улиц Томска, на которых проведена подобная реконструкция, показали аналогичные результаты: недостаточный уровень освещенности, высокая неравномерность распределения освещенности, экономическая необоснованность мероприятий. Очевидная бесперспективность реконструкции путем прямой замены ламповых светильников СДС без тщательного подбора мощности и КСС привела к ситуации, когда на улицах Томска произошло ухудшение качества освещения.

Тестирование в течение 2011–2013 гг. светильников, производимых предприятиями г. Томска и ввозимых извне, в городских осветительных сетях НО (7 типов светильников) не подтверждает целесообразность реконструкции путем прямой замены высокоэффективных ламповых светильников (лампы ДНаТ) светодиодными. Результаты тестирования не позволяют рекомендовать ни один из представленных СДС в качестве универсального для прямой замены ламповых светильников в городских сетях НО. Каждый из светильников имеет свою нишу применения. Впрочем, такая реконструкция УНО может показаться эффективной при замене светильников с устаревшими лампами ДРЛ, благодаря 2–3-кратному превосходству СДС по энергетической эффективности, если не принимать во внимание ценовые параметры. Учитывая многообразие вариантов исполнения и характеристик СДС, представленных на светотехническом рынке России, целесообразно решать задачи применения ССТ в сетях НО адресно для объектов с детальной проработкой ТЭО. Очевидно,

что реконструкция должна предусматривать индивидуальный подбор типа светильника сообразно категории дороги и ее геометрии, грамотный выбор КСС и мощности и, вероятнее всего, более глубокие изменения в УНО, например, схемы построения, шага и параметров опор.

Таблица 4

**Технико-экономические показатели мероприятий  
по реконструкции УНО**

Энергосберегающий эффект в расчёте на 1 светильник	УНО ул. Нахимова	УНО ул. Елизаровых и ул. Пушкина
Экономия по мощности*, Вт	13	-95
Время эксплуатации УНО, ч/год	4500	
Экономия ЭЭ, кВт·ч/год	58	0
Тариф на ЭЭ, руб./кВт·ч (2013 г.)	4	
Экономия денежных средств на оплату ЭЭ, руб./год	232	0
Капитальные затраты на реконструкцию** УНО, руб.	16000	22000
Срок окупаемости, год	60	Не окупается

\* Параметры ОУ приведены к условиям, при которых удовлетворяются нормативные требования.

\*\* Учтена только стоимость одного светильника.

Тем не менее, принимая тенденцию широкого внедрения светодиодной светотехники в НО как объективный прогрессивный процесс, следует обозначить содержание мероприятий по реконструкции сетей НО и технические решения, обеспечивающие уже на сегодняшнем уровне энергетической эффективности и ценовых показателей СДС конкурентный вариант использования ССТ и уход от волюнтаристских решений. Поскольку эффективность применения новой техники напрямую зависит от получаемого эффекта энергосбережения, перспективными являются варианты, создающие максимальную экономию не в ущерб качеству световой среды. К таким техническим решениям следует отнести применение интеллектуальных систем автоматического управления (САУ) УНО [16], основанных на использовании важного качества и преимущества СДС над ламповой техникой – управляемости. Системы НО, интегрированные с САУ, сокращают время работы УНО в номинальном режиме в период отсутствия на территории улицы автотранспорта или прохожих и позволяют кратно увеличить энергосберегающий эффект. САУ эффективны благодаря высокой управляемости СДС, позволяющей настраивать динамические режимы эксплуатации при уровне плавного диммирования в диапазоне 1–100 % [17, 18]. Потенциал энергосбережения в УНО, интегрированной с САУ, может возрасти до 60–80 %.

### Заключение

На текущий момент традиционная светотехника, представленная современными разрядными лампами и, соответственно, светильниками, остается конкурентоспособной в сетях наружного освещения и в большинстве случаев превосходящей ССТ по техническим, эксплуатационным, стоимостным пара-

метрам и энергоэффективности. Эти обстоятельства обуславливают предпочтительное использование ламповой техники в сетях НО. Опыт применения ССТ в НО г. Томска не рационален.

Технико-экономические показатели мероприятий по реконструкции УНО г. Томска демонстрируют бесперспективность прямой замены ламповых светильников светодиодными без тщательного подбора мощности, КСС, расчета параметров и грамотного построения схемы. Светодиодных светильников универсального типа для прямой замены ламповых светильников пока не существует, большинство светильников имеют свою нишу применения.

В настоящий момент для достижения положительного экономического эффекта от внедрения ССТ целесообразно применить прогрессивные технические решения, позволяющие увеличить технико-экономический эффект, например, использовать интеллектуальные САУ УНО.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Справочная книга по светотехнике* /под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. *Свод правил* Российской Федерации «Естественное и искусственное освещение», СП 52.13330.2011. – М., 2011. – 78 с.
3. *Варфоломеев, Л.П.* О конструировании осветительных приборов со светодиодами и целесообразных областях их применения / Л.П. Варфоломеев // *Светотехника*. – 2011. – № 3. – С. 4–11.
4. *Перспектив ОАО «Ке2» «Предложение по установке плазменных светильников»*, 2012. – 16 с.
5. *Индукционные лампы, индукционные светильники* // *DAR Light*. – Условия доступа : [www.darlight.ru](http://www.darlight.ru) (дата обращения : 21.01.2014).
6. *Варфоломеев, Л.П.* Международная выставка декоративного и технического освещения, электротехники и автоматизации зданий «Interlight Moscow powered by Light+Building» / Л.П. Варфоломеев // *Светотехника*. – 2013. – № 1. – С. 64–71.
7. *Шонина, Е.* Новинка: индукционный светильник ФСП4001И ИЕК® / Е. Шонина, В. Селверстов // *Современная светотехника*. – 2012. – № 5 (18). – С. 74–75.
8. *Рейтинг светодиодных светильников для дорог и магистралей* / Ю. Трофимов, В. Цвирко, С. Бобров, Д. Шумак, Д. Старовойтов, С. Гужов, А. Малахов, Е. Ильина, А. Булдыгин, А. Крымов, Д. Зубков, А. Сапрыкин, И. Евдасёв, В. Манушкин [и др.] // *Современная светотехника*. – 2011. – № 5 (12). – С. 6–24.
9. *Лунчев, В.А.* Современные традиционные и светодиодные технологии для уличного освещения: «за» и «против» / В.А. Лунчев // *Светотехника*. – 2013. – № 5/6. – С. 18–23.
10. *Пчелин, В.М.* К вопросу об оценке энергоэффективности / В.М. Пчелин // *Светотехника*. – 2013. – № 5/6. – С. 70–71.
11. *Интервью журналов «Светотехника» и «Light&Engineering»* / Lou Bedocs, Wout van Bommel, Peter Thorns, Janos Schanda, Richard Kittler, Stanislav Darula // *Светотехника*. – 2013. – № 1. – С. 6–7, 51–56; / Peter Boyce, Lars Bylund // *Светотехника*. – 2013. – № 5/6. – С. 88–98.
12. *Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов СН 541–82*.
13. *Свет и безопасность на федеральных автомобильных дорогах. Обзор одноименной конференции* / записал и подготовил Ю. Хмылев // *Lumen&ExpertUnion*, спецвыпуск. – 2013. – № 01 (4). – С. 32–43 ([www.LUMEN2B.ru](http://www.LUMEN2B.ru)).
14. *Ван Боммель, В.* Спектр источников света и слабое освещение: некоторые основные положения / В. Ван Боммель // *Светотехника*. – 2009. – № 6. – С. 13–16.
15. *Фотиз, С.* Уличное освещение для пешеходов в жилых районах: выбор оптимальных цветовых характеристик ламп / С. Фотиз, К. Чил // *Светотехника*. – 2009. – № 6. – С. 28–32.

16. *Перспективный подход к уличному освещению светодиодами*. Реферат Е.И. Розовского статьи «Taking the Long View on LED Street Lighting» / M. Siminovitch // Журнал LD+A, July 2010. – Светотехника. – 2010. – № 5. – С. 40.
17. *Киричок, А.И.* Энергоэффективные решения в системах управления наружным освещением / А.И. Киричок // Энергосбережение. – 2013. – № 7. – С. 40–41.
18. *Светодиодное уличное освещение: стандарты, проблемы, перспективы*. Интервью номера. – Условия доступа : [www.lightingmedia.ru](http://www.lightingmedia.ru) // Рынок светотехники. – 2012. – № 2. (09). – С. 16–17.

## REFERENCES

1. *Spravochnaya kniga po svetotekhnike* [Lightning engineering handbook]. Ed. Yu.B. Aizenberg. Moscow : Znak. 2006. 972 p. (rus)
2. *SNiP 52.13330.2011* «Natural and artificial lighting», Moscow : 2011. (rus)
3. *Varfolomeev, L.P.* O konstruirovaniy osvetitel'nykh priborov so svetodiodami i tselesoobraznykh oblastyakh ikh primeneniya [Design of light-emitting diode lightning equipment and fields of application]. *Light and Engineering*, 2011. No. 3. Pp. 4–11. (rus)
4. *Prospekt OAO «e2»* «Predlozhenie po ustanovke plazmennyykh svetil'nikov» [Prospect OAO «e2» 'Plasma lamp installation proposal']. 2012. (rus)
5. *Product Catalog* Luxim Corporation «Product Specification», 2011.
6. *Varfolomeev, L.P.* International Trade Fair for Decorative and Technical Lighting, Electrical Engineering, Home and Building Automation «Interlight Moscow powered by Light+Building». *Light and Engineering*. 2013. No. 1. Pp. 64–71. (rus)
7. *Shonina, E., Seliverstov, V.* Novinka: induktsionnyi svetil'nik FSP4001I IEK® [Novelty: induction lamp FSP4001I IEK®]. *'Modern Lighting' Magazine*. 2012. No. 5 (18). Pp. 74–75. (rus)
8. *Trofimov, Yu., Tsvirko, V., Bobrov, S., Shumak, D., Starovoirov, D., Guzhov, S., Malakhov, A., Il'ina, E., Buldygin, A., Krymov, A., Zubkov, D., Saprykin, A., Evdasev, I., Manushkin, V.* Reiting svetodiodnykh svetil'nikov dlya dorog i magistrali [Roads and highways LED fixture ranking]. *'Modern Lighting' Magazine*. 2011. No. 5 (12). Pp. 6–24. (rus)
9. *Lunchev, V.A.* Sovremennyye traditsionnyye i svetodiodnyye tekhnologii dlya ulichnogo osveshcheniya: «za» i «protiv» [Traditional and modern LED technology for street lighting: *pro* and *con*]. *Light and Engineering*. 2013. No. 5/6. Pp. 18–23. (rus)
10. *Pchelin, V.M.* K voprosu ob otsenke energoeffektivnosti [Towards estimation of energy efficiency]. *Light and Engineering*. 2013. No. 5/6. Pp. 70–71. (rus)
11. *Bedocs, L., Bommel, W., van, Thorns, P., Schanda, J., Kittler R., Darula, S.* Interview of journals "Lighting Engineering" and «Light & Engineering». *Light and Engineering*. 2013. No. 1. Pp. 6–7, 51–56; P. Boyce, L. Bylund *Light and Engineering*. 2013. No. 5/6. Pp. 88–98.
12. *Instruktsiya po proektirovaniyu naruzhnogo osveshcheniya gorodov, poselkov i sel'skikh naselennykh punktov CH 541–82* [Instructions for outdoor lighting design in cities and villages CH 541–82]. (rus)
13. *Khmylev, Yu.* Svet i bezopasnost' na federal'nykh avtomobil'nykh dorogakh. Obzor odnoimennoi konferentsii [Light and safety on federal automobile roads]. *Lumen&ExpertUnion*, 2013. No. 01 (4). Pp. 32–43. (rus)
14. *Bommel', W., van.* The spectrum of light sources and low lighting levels: the basics. *Light and Engineering*. 2009. No. 6. Pp. 13–16. (transl. from Engl.)
15. *Fotiz, S., Chil, K.* Ulichnoe osveshchenie dlya peshekhodov v zhilykh raionakh: vybor optimal'nykh tsvetovykh kharakteristik lamp [Street lightning in residential districts: a choice of optimum color characteristics of lamps]. *Light and Engineering*. 2009. No. 6. Pp. 28–32. (transl. from Engl.)
16. *Siminovitch, M.* A review of paper «Taking the long view on LED street lighting» by E.I. Rozovskii. *LD+A, Light and Engineering*. 2010. No. 5. Pp. 40. (rus)
17. *Kirichok, A.I.* Energoeffektivnyye resheniya v sistemakh upravleniya naruzhnym osveshcheniem [Energy efficient outdoor lighting control systems]. *Energoberezhenie*. 2013. No. 7. Pp. 40–41. (rus)
18. *Svetodiodnoe ulichnoe osveshchenie: standarty, problemy, perspektivy*. [LED street lighting : standards, problems, prospects]. *Rynok Svetotekhniki*, 2012. No. 2 (09). Pp. 16–17. (rus)

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.011.1

*УКРАИНЧЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук,  
ст. преподаватель,*

*279372@mail.ru*

*ЖАДАНОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,*

*organ-2003@bk.ru*

*КАЛИНИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, преподаватель,*

*bibis@rambler.ru*

*Оренбургский государственный университет,*

*460000, г. Оренбург, пр. Победы, 13*

### **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ И ПАНЕЛЕЙ СТЕН С КЛЕЕДОЩАТОЙ ОБШИВКОЙ\***

В статье приведены методика и результаты численных исследований сжато-изгибаемых деревянных панелей с клеешпошатоу обшивкой из брускоу. Выявлены и проанализированы закономерности изменения напряженно-деформированного состояния разработанных панельных конструкций в зависимости от статических и геометрических параметров, расположения обшивки в сжатой или растянутой зонах поперечного сечения, наличия предварительного напряжения поперек волокон обшивки за счет поперечного армирования. Получены расчетные формулы, дающие возможность учесть степень влияния фактических параметров разработанных панелей на величину коэффициентов приведения клеешпошатых обшивок.

**Ключевые слова:** панель; древесина; ребро; обшивка; поперечный изгиб; численные исследования; прочность; напряжения; деформации; коэффициент приведения.

*DMITRII A. UKRAINCENKO, PhD, Assistant Professor,*

*279372@mail.ru*

*VIKTOR I. ZHADANOV, DSc, Professor,*

*organ-2003@bk.ru*

*SERGEI V. KALININ, Lecturer,*

*bibis@rambler.ru*

*Orenburg State University,*

---

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.U02.21.0129.

13, Pobedy Ave., 460000, Orenburg, Russia

## NUMERICAL STUDIES OF ROOF SLABS AND WALL PANELS COVERED WITH LAMINATED BARS

The paper presents methods and results of numerical studies provided for compressed bending wood panels covered with laminated bars. Stress and strain states of the suggested wall panel systems were analyzed depending on static and geometrical parameters, location of sheeting in compressed and tensile regions of cross-section, prestressing across fibres of sheeting due to shear reinforcement. The paper gives design formulas for actual parameters of wall panels affecting the value of reduction coefficient of laminated bar sheeting.

**Keywords:** wall panel; wood; rib; sheeting; transverse bending; numerical studies; strength; stress; deformation; reduction coefficient.

При расходовании на нужды деревянного малоэтажного строительства больших объемов материальных и энергетических ресурсов повышение эффективности их использования приобретает существенное значение и становится важной народнохозяйственной проблемой. Такое повышение может быть достигнуто за счет увеличения уровня индустриализации и степени заводской готовности строительных конструкций и деталей, расширения практически полносборного панельного строительства из унифицированных элементов.

Технологическая унификация может быть достигнута без существенных капитальных вложений за счет применения панельных конструкций, в которых деревянные цельные или клееные несущие ребра сочетаются с клеодошатай обшивкой.

В связи с вышеизложенным, авторами разработаны панели с клеодошатай обшивкой, отличающиеся рядом положительных качеств в сравнении с известными зарубежными и отечественными аналогами [1]. В состав разработанных панелей П-образного поперечного сечения входят два продольных деревянных ребра и клеодошатая обшивка, которая приклеена к ребрам с гвоздевым прижимом, что позволяет включить ее в общую работу конструкции. Включение обшивки в работу существенно увеличивает момент инерции и сопротивления поперечного сечения, что и приводит к экономии материала. Неизменяемость поперечного сечения обеспечивается диафрагмами жесткости, установленными на расстоянии 500 мм от торцов элемента из условия конструирования опорных узлов. Соединение основных ребер и диафрагм жесткости выполняется при помощи клеенных стержней, металлических пластин или на зубчатый шип. Открытые продольные ребра позволяют легко выполнять узлы сопряжения панелей с нижележащими конструкциями.

Новизной предложенного технического решения является то, что клеодошатая обшивка выполнена с предварительным напряжением из склеенных между собой брусков поперечным сечением не более чем  $45 \times 45$  мм. Предварительное напряжение в обшивке создается за счет стальных стержней из арматурной стали класса А-III диаметром 8–12 мм, клеенных с шагом 300–500 мм по всей длине пакета на всю его ширину в заранее высверленные

отверстия. При изготовлении клееного щита контролируемая нагрузка прикладывается к древесине в направлении поперек волокон, при этом обеспечивается запрессовочное давление, равное 0,5 МПа. Какая-либо нагрузка к армирующим стержням не прикладывается. После отверждения клея давление снимается, при этом древесина, работающая в упругой стадии, будет стремиться вернуть первоначальную ширину пакета, чему будут препятствовать вклеенные стержни, воспринимающие в тот момент давление, созданное при запрессовке пакета. Создание предварительного напряжения препятствует образованию усушечных трещин, повышает эксплуатационную надежность и эстетические качества панельной конструкции в целом. Отметим, что в клеодощатых щитах с предварительным напряжением после их хранения в холодном помещении в течение 14 месяцев какие-либо усушечные трещины и следы раскалывания отсутствовали, а щиты без предварительного напряжения были покороблены и требовали проведения ремонтных работ по зачеканке трещин.

Точность расчета предложенных панельных конструкций в значительной мере зависит от правильности учета вовлеченной в общую работу клеодощатой обшивки. Степень включения обшивки в общую работу, как известно, оценивается коэффициентом приведения (коэффициент полезной ширины, редуцированный коэффициент), зная который, можно с достаточной для практических целей точностью рассчитать предложенные панельные конструкции. Наиболее близкие к направлению проводимых исследований работы выполнены в Сибстрине (г. Новосибирск) и СФУ (г. Красноярск) под руководством д.т.н., профессора П.А. Дмитриева. Так, изучению изгибаемых и сжато-изгибаемых плит и панелей с фанерной обшивкой посвящены труды С.В. Дерордиева, В.И. Жаданова, И.С. Инжутова, В.И. Хорошего [2], которые показали высокую эффективность включения ограждающих элементов в общую работу конструкции.

Однако проведенные исследования не отражают особенностей работы деревянных каркасных панелей с клеодощатой обшивкой толщиной более 20 мм, которая может быть расположена как в сжатой, так и в растянутой зонах поперечного сечения. По нашему предположению, обшивка с увеличенной толщиной повысит эффективность ее участия в общей работе системы. Также на степень участия обшивки в общей работе конструкции будут влиять не только статические и геометрические параметры разработанных конструкций, но и характер работы обшивки на сжатие или растяжение. Кроме этого, в научно-технической литературе отсутствуют данные о влиянии на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции предварительного напряжения поперек волокон древесины обшивки, создаваемого при помощи стальных стержней. Предположительно такое предварительное напряжение может увеличить степень включения дощато-клееной обшивки в общую работу конструкции.

Таким образом, целью численных исследований явилось изучение фактического напряженно-деформированного состояния предложенных конструктивных форм. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– выявить и проанализировать закономерности изменения напряженно-деформированного состояния предложенных конструктивных форм в зависимости от статических и геометрических параметров;

– определить влияние схемы расположения обшивки в сжатой или растянутой зонах поперечного сечения на НДС разработанных конструкций;

– установить влияние предварительного напряжения в обшивке за счет поперечного армирования на степень ее участия в работе конструкции;

– проверить устойчивость сжатых обшивок;

– на основе результатов численных исследований усовершенствовать инженерную методику расчета панельных конструкций с клеодощатой обшивкой.

В качестве основного инструмента численных исследований напряженно-деформированного состояния изгибаемых и сжато-изгибаемых панелей с клеодощатой обшивкой, включенной в общую работу конструкции, был применен пакет прикладных программ SCAD. Дублирование полученных результатов осуществлялось при помощи программного комплекса «ЛИРА».

Объектом численных исследований явились панельные конструкции П-образного поперечного сечения и в виде двойного Т, состоящие из несущих деревянных ребер и жестко присоединенной к ним клеодощатой обшивки.

Для обеспечения возможности сравнения расчетных и экспериментальных данных основные геометрические и физические параметры панелей принимались такими же, как и в опытных конструкциях, определенных предварительно путем приближенного статического расчета по прочности и деформативности в соответствии с требованиями [2, 3]. В качестве базового варианта была принята панель с размерами в плане  $1,5 \times 3,0$  м П-образного поперечного сечения.

Задачей численных исследований являлось, прежде всего, определение характера распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивках разработанных панелей в зависимости:

– от пролета;

– шага несущих ребер;

– толщины обшивки;

– схемы работы панели (на изгиб или сжатие с изгибом);

– положения обшивки в сжатой или растянутой зонах поперечного сечения панели;

– наличия предварительного напряжения поперек волокон обшивки за счет поперечного армирования.

Кроме того, при проведении численных исследований в каждом случае определялись характер распределения изгибных напряжений в ребрах и прогибы конструкций в характерных точках.

С целью установления закономерности влияния вышеперечисленных параметров в расчетах варьировались следующие величины: пролет панели  $L_{п} = 3-6$  м; шаг несущих ребер  $a_p = 0,75, 1,5, 3,0$  м; толщина клеодощатой обшивки  $\delta_{об} = 32, 40, 45$  мм; схема работы – изгиб или сжатие с изгибом; условие закрепления концов – шарнир – шарнир (стена, перекрытие или покрытие), защемление – свободный конец (вариант стенового ограждения); сжимающая нагрузка  $N = 0-60$  кН; положение обшивки – в сжатой или

растянутой зоне поперечного сечения; усилие предварительного напряжения в обшивке в поперечном направлении  $-0,5-5,0$  кН.

Изгибная равномерно распределенная нагрузка прикладывалась непосредственно по всей площади конечных элементов, моделирующих клеодошащую обшивку, и в виде линейной нагрузки по длине несущих ребер. Сжимающая сосредоточенная нагрузка была приложена в точку ребра, расположенную на нейтральной оси опорного поперечного сечения панели.

На расчетной схеме элементы панелей (обшивку, несущие ребра и диафрагмы) моделировали прямоугольными плоскими конечными элементами, узлы сопряжения между которыми приняты абсолютно жесткими. Кроме этого, выбранные конечные элементы позволяли учесть ортотропность материалов с упругими характеристиками, полученными на основе статических испытаний стандартных образцов, вырезанных из опытных конструкций. Упругие характеристики обшивки составили: модуль упругости вдоль волокон  $E_x = 11\,700$  МПа, поперек волокон  $E_y = 400$  МПа, коэффициент Пуассона вдоль волокон  $\mu = 0,5$ , поперек волокон  $\mu = 0,02$ , модуль сдвига  $G = 500$  МПа. Модуль упругости несущих ребер и диафрагм вдоль волокон составил  $E_x = 12\,600$  МПа.

Степень влияния вышеприведенных факторов оценивалась изменением неравномерности распределения нормальных напряжений  $\sigma_x$  по ширине обшивки, характеризующейся коэффициентом приведения, определяемым по формуле

$$k_{об} = \frac{\sigma_x^{cp}}{\sigma_x^{max}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x^{cp}$  – среднее нормальное напряжение по ширине обшивки в рассматриваемом сечении;  $\sigma_x^{max}$  – максимальное значение нормальных напряжений, возникающих в обшивках в месте их присоединения к основным ребрам.

Средние нормальные напряжения в обшивке с учетом характера их распределения по ширине поперечного сечения определяются как

$$\sigma_x^{cp} = \frac{1}{b_{об}} \int_a^{b_{об}} \sigma_x d_y \approx \frac{1}{b_{об}} \sum_{i=1}^n \sigma_x \Delta y^i, \quad (2)$$

где  $\sigma_x^i$  – значения нормальных напряжений в каждой точке по ширине сечения;  $\Delta y^i$  – ширина участка обшивки между соседними точками измерений;  $b_{об}$  – ширина обшивки между ребрами.

В ходе проведения численных исследований выявлено, что сжимающие напряжения в обшивке изгибаемой панели размером  $1,5 \times 3,0$  м в наиболее напряженном отсеке имеют максимальные значения у основных ребер и уменьшаются к середине ширины конструкции. Такой характер распределения напряжений сжатия в обшивке сохранялся по всей длине конструкции, а изменение значения коэффициента приведения обшивки по всему пролету конструкции оставалось практически неизменным. Коэффициент приведения обшивки  $k_{об}$ , определенный по формуле (1), для панели  $1,5 \times 3,0$  м с толщиной обшивки 40 мм составил 0,46.

Значительно меньшая неравномерность распределения сжимающих напряжений в обшивке наблюдалась при уменьшении шага несущих ребер (рис. 1).

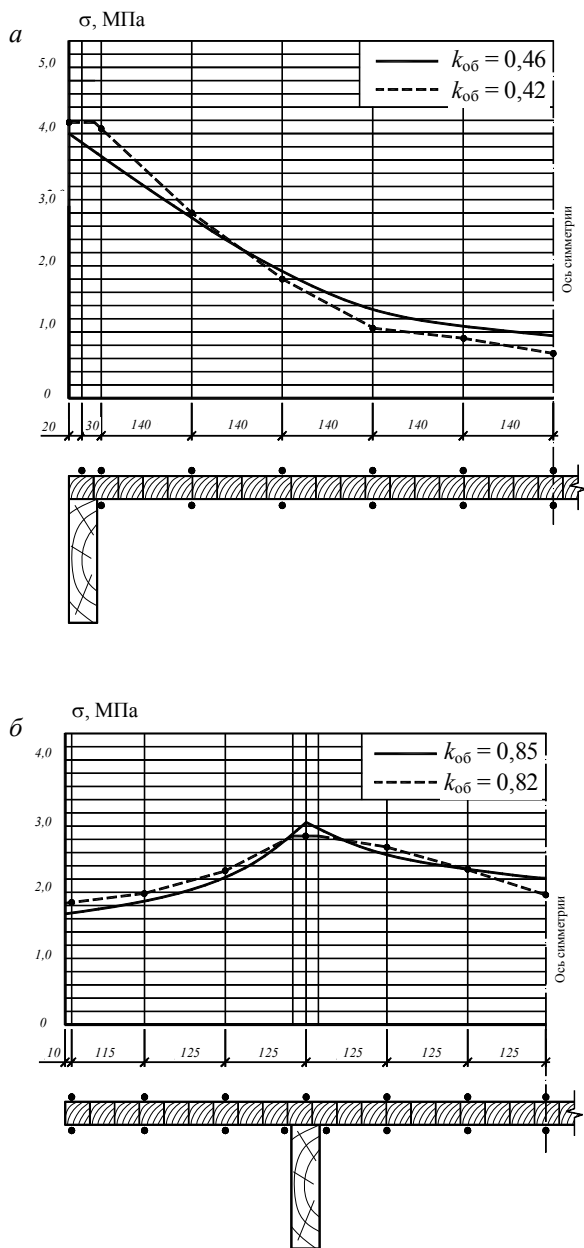


Рис. 1. Распределение нормальных сжимающих напряжений в обшивке толщиной 40 мм панели 1,5×3,0 м:

*a* – при шаге несущих ребер 1,5 м; *б* – при шаге несущих ребер 0,75 м;

— теоретические данные; - - - - экспериментальные данные

Например, уменьшение шага несущих ребер до  $a_p = 0,75$  обеспечило повышение коэффициента  $k_{об}$  до 0,85. Значительно большую неравномерность распределения по ширине обшивки имели нормальные сжимающие напряжения в панели шириной 3,0 м. Коэффициент приведения обшивки в этом случае составил  $k_{об} = 0,32$ .

Увеличение толщины клеодошатай обшивки от 32 до 40 и 45 мм приводило к частичному выравниванию эпюры сжимающих напряжений в обшивке, вследствие чего увеличивалось и значение коэффициента приведения. Стоит заметить, что изменение коэффициента в большую сторону за счет увеличения толщины обшивки наблюдалось при различном шаге несущих ребер панелей. Полученные результаты для каждого из рассматриваемых случаев представлены в таблице.

### Значение коэффициентов приведения обшивки для панели пролетом 3,0 м при различном шаге основных ребер и толщине обшивки

Шаг основных ребер, мм	Толщина обшивки ( $\delta_{об}$ ), мм		
	32	40	45
750	0,82	0,85	0,87
1500	0,37	0,46	0,51
3000	0,28	0,32	0,36

Для удобства выполнения практических расчетов полученные данные можно выразить в виде формул. Квадратичная аппроксимация значений таблицы при подстановке  $\delta_{об}$  в сантиметрах приводит к соотношениям:

$$k_{об}^{750} = 0,002 \cdot \delta_{об}^2 + 0,023 \cdot \delta_{об} + 0,724, \quad (2)$$

$$k_{об}^{1500} = -0,01 \cdot \delta_{об}^2 + 0,183 \cdot \delta_{об} - 0,113, \quad (3)$$

$$k_{об}^{3000} = 0,023 \cdot \delta_{об}^2 - 0,116 \cdot \delta_{об} + 0,415. \quad (4)$$

Для определения степени влияния пролета на значение коэффициента  $k_{об}$  авторами были выполнены расчеты конструкций при фиксированных параметрах ширины панели и толщины обшивки с варьированием пролета от 3,0 до 6,0 м. Выполненные расчеты показали, что при увеличении пролета панели увеличивается коэффициент приведения обшивки. Так, для панели шириной 1,5 м при увеличении пролета с 3,0 до 6,0 м при толщине клеодошатай обшивки 40 мм значение  $k_{об}$  увеличилось с 0,46 до 0,52, т. е. величина изменения достигает 12 %. Аналогичные результаты были получены и при других исходных параметрах панелей, что говорит о необходимости учета этого фактора в расчетах конструкций. Учет может быть осуществлен при помощи введения к полученным ранее значениям коэффициентов приведения (таблица) поправочного коэффициента  $k_l$ , который может быть определен по аппроксимированной формуле

$$k_l = 0,662 + 0,338 \sqrt{\frac{L_n}{L_{баз}}}. \quad (5)$$

Такой подход позволяет учитывать фактическую длину панели. При этом величина погрешности, в соответствии с полученными данными численных исследований по программам SCAD и «Лира», составляет не более 2 %, что можно считать вполне приемлемым для выполнения практических расчетов (рис. 2).

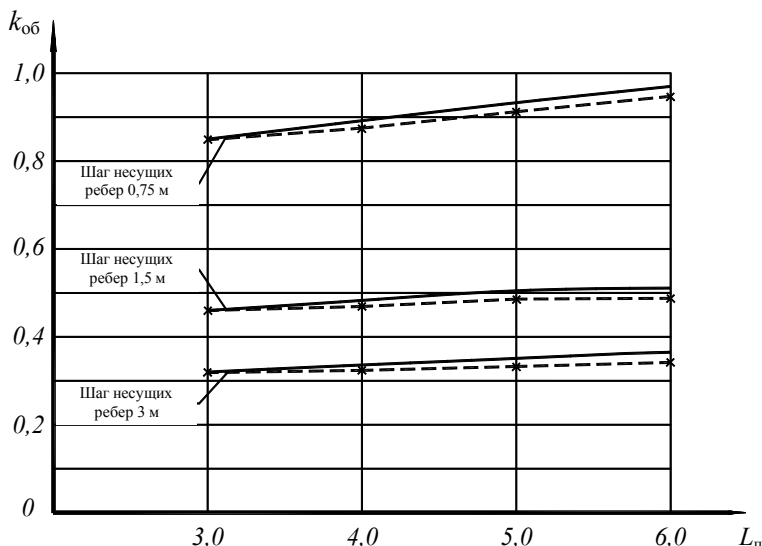


Рис. 2. График зависимости степени влияния изменения пролета панели на значение коэффициента приведения обшивки:  
 - - - - - данные численных исследований; ————— результаты, полученные по аппроксимированной формуле

Область применения разработанных панельных конструкций предопределяет их работу на совместное действие сил сжатия и изгиба. Так, при использовании панелей в покрытии скатной кровли или в составе верхнего пояса ферм на конструкцию будут действовать одновременно изгибающая нагрузка, возникающая в результате скопления снега, и сила сжатия. Кроме этого, ярким примером работы панели на сжатие с изгибом может служить ее использование в конструкции стенового ограждения. При вертикальной ориентации панелей изгиб вызывает ветровая нагрузка, а в состав продольных сил сжатия входят нагрузки от вышерасположенных конструкций покрытия и перекрытий. Кроме этого, значительный изгибающий момент в сжато-изгибаемых панелях может быть вызван эксцентричным приложением продольных сил. Отметим, что с точки зрения удобства выполнения узлов, их центрации сжимающая нагрузка всегда передается на основные ребра панели, а обшивка вовлекается в общую работу конструкции только за счет жесткого клеевого соединения с продольными деревянными несущими ребрами. Данный факт предопределяет необходимость исследования особенностей напряженно-деформированного состояния панелей при их работе на сжатие с изгибом.

Степень участия обшивки в общей работе сжато-изогнутой конструкции исследовалась в зависимости от величины сжимающей силы при других фиксированных параметрах и сравнивалась с данными, полученными для случая изгиба. При таком подходе можно проверить возможность применения ранее полученных результатов для изгибаемых конструкций в расчетах сжато-изгибаемых панелей.

Характер распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке панели длиной 3,0 м с шагом ребер 1,5 м при совместном действии изгибающей нагрузки и продольной силы показан на рис. 3. Как видно из рис. 3, продольные сжимающие силы, не изменяя в целом очертания эпюры сжимающих напряжений, влияют на степень участия обшивки в общей работе конструкции. Так, приложение сжимающего усилия, равного 60 кН, к панели 1,5×3,0 м приводит к снижению коэффициента приведения на 6,5 %, что соответствует  $k_{об} = 0,43$ . Проведенные исследования при различных параметрах панелей позволили установить, что коэффициент приведения обшивки с учетом действия продольных сжимающих сил может быть определен по данным таблицы при условии введения поправочного коэффициента  $k_e$ , учитывающего фактическое соотношение значений продольной силы сжатия и изгибающего момента. Такой подход был впервые применен профессором И.С. Инжутовым [4] для расчета клеефанерных панелей верхних поясов блочных ферм. Аппроксимация полученных результатов позволила выразить значение коэффициента  $k_e$  в виде

$$k_e = 1 - 0,03 \sqrt{\frac{N \cdot c}{M}}, \quad (6)$$

где  $N$  – расчетное продольное усилие, кН;  $M$  – расчетный изгибающий момент, кНм;  $c = 1$  м – коэффициент на единицы измерения.

Расхождения в значениях коэффициентов приведения обшивки, определенных по таблице с введением коэффициента  $k_e$  по формуле (6) и полученных в результате численных расчетов, не превышали 3 %.

В ряде случаев целесообразно ориентировать клеедощатую обшивку внутрь помещения. При такой ориентации она оказывается в растянутой зоне поперечного сечения панели. Отсутствие информации по определению степени участия растянутой обшивки в общей работе конструкции привело к необходимости изучения особенностей ее работы на растяжение.

В ходе исследования панелей с обшивкой, расположенной в растянутой зоне поперечного сечения, варьировались те же статические и геометрические параметры, что и для панелей с обшивкой, расположенной в сжатой зоне. Численные исследования показали, что распределение сжимающих напряжений в обшивке, расположенной в растянутой зоне, имеет тот же характер, что и в обшивке, расположенной в сжатой зоне. Числовые значения напряжений также не изменяются, за исключением изменения знака на противоположный, т. е. расположение обшивки в растянутой зоне поперечного сечения панели не оказывает влияния на величину коэффициента  $k_{об}$ , причем значение этого коэффициента также не меняется по длине обшивки.

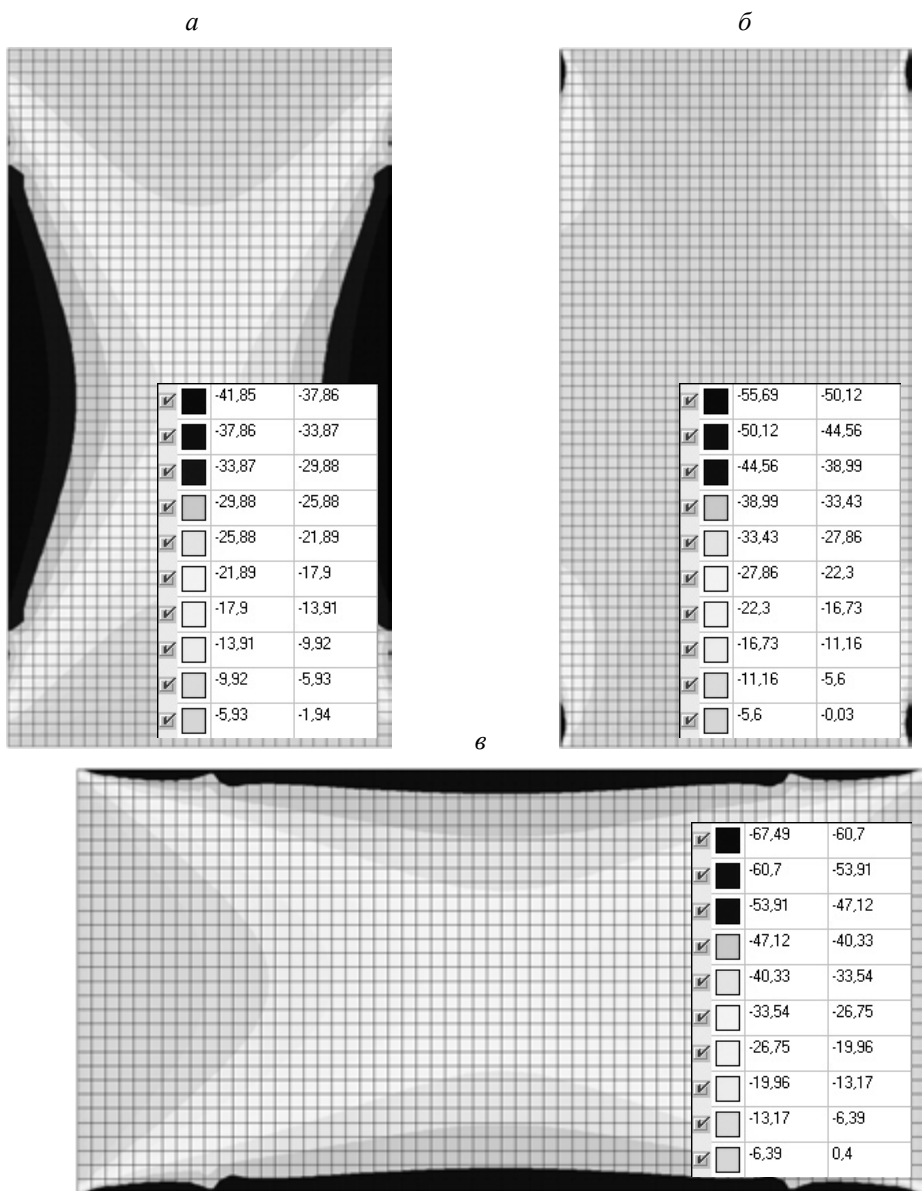


Рис. 3. Изополя нормальных сжимающих напряжений в обшивке панели  $1,5 \times 3,0$  м:  
*а* – при действии изгибающей нагрузки; *б* – при действии сжимающего усилия; *в* – при совместном действии изгибающей нагрузки и сжимающего усилия

Особенностью разработанных панельных конструкций является то, что клеодощатая обшивка выполняется с предварительным напряжением, создаваемым при ее изготовлении вклеенными поперечными арматурными стержнями. Такое преднапряжение, по выдвинутой авторами гипотезе, должно увеличивать степень участия обшивки в общей работе конструкции, что и явилось предметом этой части численных исследований.

В расчетной схеме предварительное напряжение в обшивке моделировалось двумя способами. Первый способ заключался в приложении сосредоточенного сжимающего усилия с противоположных сторон обшивки. Второй способ подразумевал моделирование предварительного напряжения путем приложения распределенной нагрузки по линии стержня в плоскости обшивки. В том и другом случае менялся шаг приложения нагрузки от 0,3 до 0,5 м.

Проведенные исследования показали, что влияние предварительного напряжения на степень участия обшивки в общей работе конструкции оказалось незначительным (рис. 3, 4), при этом коэффициент приведения увеличивался не более чем на 2–3 %. Так, для сжато-изгибаемой панели с размерами 1,5×3,0 м и толщиной обшивки, равной 40 мм, создание предварительного напряжения позволило увеличить коэффициент приведения до значения 0,44 при базовом значении  $k_{об} = 0,43$ .

Стоит заметить, что при работе панельной конструкции на изгибающую нагрузку поперечное армирование не оказало какого-либо влияния на коэффициент приведения обшивки.

Следовательно, эффективность поперечного армирования целесообразно рассматривать только с точки зрения повышения трещиностойкости клеешовчатой обшивки.

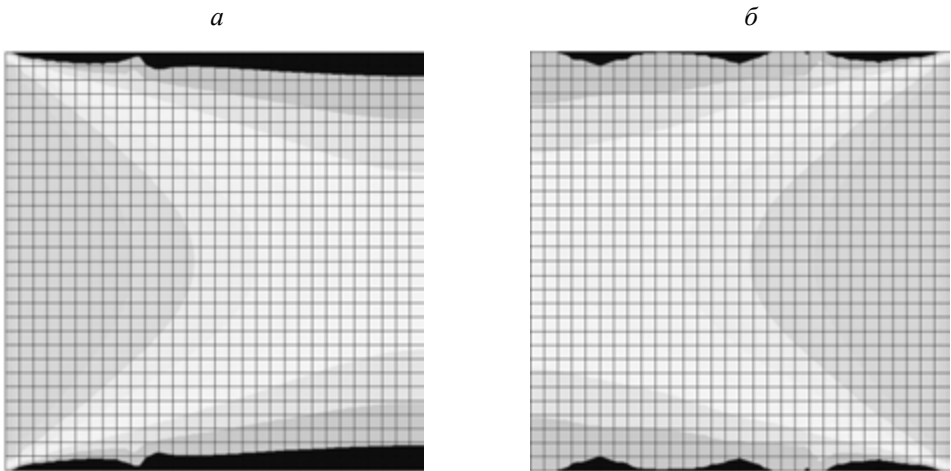


Рис. 4. Изополя нормальных сжимающих напряжений в обшивке панели 1,5×3,0 м:  
*а* – без предварительного напряжения; *б* – при действии предварительного напряжения

### Выводы

1. Проведенные численные исследования позволили выявить и проанализировать закономерности изменения напряженно-деформированного состояния предложенных панелей с клеешовчатой обшивкой в зависимости от различных факторов. Использование методики оценки напряженно-деформированного состояния новых конструктивных форм, основанной на методе конечных элементов, позволило достаточно точно характеризовать их работу под действием нагрузок.

2. Степень неравномерности распределения нормальных напряжений по ширине обшивки, характеризуемая коэффициентом приведения  $k_{об}$ , зависит в основном от шага несущих ребер и толщины обшивки, причем увеличение шага ребер с 750 (min) до 3000 мм (max) приводит к уменьшению коэффициента приведения  $k_{об}$  на 58–67 %, а толщины обшивки с 32 до 40 мм обеспечивает увеличение  $k_{об}$  на 6–22 %. Влияние фактического значения пролета конструкции и величины продольных сжимающих сил с достаточной для практических целей точностью можно учесть при помощи введения в расчет поправочных коэффициентов  $k_i$ ,  $k_e$ .

3. Расположение обшивки в сжатой или растянутой зоне поперечного сечения панели не оказывает влияния на величину коэффициента  $k_{об}$ , причем значение этого коэффициента остается неизменным по всей длине обшивки.

4. Создание в обшивке предварительного напряжения в поперечном направлении не оказывает существенного влияния на степень ее участия в общей работе сжато-изогнутой конструкции, что выражается в увеличении коэффициента приведения не более чем на 2–3 %. При работе панельной конструкции на изгиб поперечное армирование какого-либо влияния на  $k_{об}$  не оказывает.

5. Выявлено, что в предложенных конструктивных формах устойчивость сжатой клеодошатаой обшивки обеспечивается за счет ее толщины до достижения изгибаемой или сжато-изгибаемой панели предельного состояния.

6. Полученные формулы и коэффициенты обеспечивают адекватный переход от пространственной системы к плоской «балочной» схеме.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ на полезную модель № 36404. МПК E04B 1/10. Утепленная стена вертикальной разрезки / П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, П.П. Дмитриев, Д.В. Сагантаев ; опубл. 10.03.2004, Бюл. 7. – 6 с.
2. СНиП II-25–80. Деревянные конструкции. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стройиздат, 1983 – 31 с.
3. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1976. – 28 с.
4. Инжутов, И.С. Пространственные совмещенные блок-фермы на основе древесины для покрытий зданий / И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1987. – № 1. – С. 22–27.

#### REFERENCES

1. UMP Rus. Fed. N 36404. IPC E04V 1/10. Uteplennaya stena vertikal'noi razrezki [Insulated wall slitting]. P.A. Dmitriev, V.I. Zhadanov, P.P. Dmitriev, D.V. Sagantaev. Publ. 10.03.2004, Bul. 7. 6 p. (rus)
2. SNiP II-25–80 'Derevyannye konstruktсии' [Wood structures]. Impl. 01.01.1982. Moscow : Stroyizdat, 1983. 31 p. (rus)
3. Rekomendatsii po ispytaniyu derevyannykh konstruktсии [Recommendations on wood structure tests]. TsNIISK im. Kucherenko. Moscow : Stroyizdat, 1976. 28 p. (rus)
4. Inzhutov, I.S., Dmitriev, P.A., Strizhakov, Yu.D. Prostranstvennyye sovmeshchennyye blok-fermy na osnove drevesiny dlya pokrytii zdaniy [Spatially combined wood-based roof trusses]. News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. 1987. No. 1. Pp. 22–27. (rus)

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.198

*ВОЛОКИТИН ГЕННАДИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
vgg-tomsk@mail.ru*

*СКРИПНИКОВА НЕЛЛИ КАРПОВНА, докт. техн. наук, профессор,  
nks2003@mail.ru*

*АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,  
abzaev@tsuab.ru*

*ВОЛОКИТИН ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
volokitin\_oleg@mail.ru*

*ШЕХОВЦОВ ВАЛЕНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ, студент,  
shehovcov2010@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2: АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ПЛАВЛЕНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ МОЛИБДЕНОВЫХ РУД\***

Проведено исследование методами рентгеноструктурного анализа состояния продуктов плавления отходов обогащения молибденовых руд, полученных по плазменной технологии. Определен количественный фазовый состав рудного сырья и проведено структурное описание фаз в исследуемом состоянии. Кроме того, при моделировании оксидов были установлены плотности элементарных ячеек, при которых решетка является оптимизированной, а ее энергия минимальной.

**Ключевые слова:** плазменные технологии; отходы горно-рудной промышленности; хвосты обогащения молибденовых руд; рентгеноструктурный анализ.

*GENNADII G. VOLOKITIN, DSc, Professor,  
vgg-tomsk@mail.ru*

*NELLI K. SKRIPNIKOVA, DSc, Professor,  
nks2003@mail.ru*

---

\* Работа частично поддержана грантом Президента РФ МК-2330.2013.8.

*YuRII A. ABZAEV, DSc, Professor,  
abzaev@tsuab.ru  
OLEG G. VOLOKITIN, PhD, A/Professor,  
volokitin\_oleg@mail.ru  
VALENTIN V. SHEKHOVTSOV, Student,  
shehovcov2010@yandex.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **STUDY OF PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS OF HIGH-TEMPERATURE SILICATE MELTS (PART 2). SMELTING OF TAILINGS OF MOLYBDENUM ORES BENEFICIATION**

The paper presents research into a composition of smelting tailings of molybdenum ores beneficiation using the X-ray diffraction analysis. Plasma technology was used to produce molybdenum ores. The quantitative phase composition was determined for crude ores; the structural description of phases was provided for conditions under investigation.

**Keywords:** plasma technology; ore mining; tailing wastes; X-ray diffraction analysis.

В литературе отсутствуют систематические рентгеноструктурные исследования свойств хвостов обогащения молибденовых руд с описанием количественного фазового состава после плазменной обработки.

Целью настоящей работы является изучение структурного состояния хвостов обогащения молибденовых руд, подвергнутых плазменной обработке, определение количественного состава фаз рудного сырья в аморфном состоянии полнопрофильным методом.

Порошкообразные пробы хвостов молибденовых руд изучались в аморфном состоянии. Аморфное состояние было получено в результате плазменной обработки [1]. Плазменная обработка входит в список технологических операций по изготовлению теплоизоляционных материалов из исследуемых хвостов.

На рисунке приведены результаты съемок дифрактограмм рудного сырья в аморфном состоянии [2–3]. На рисунке приведены экспериментальная и расчетная дифрактограммы.

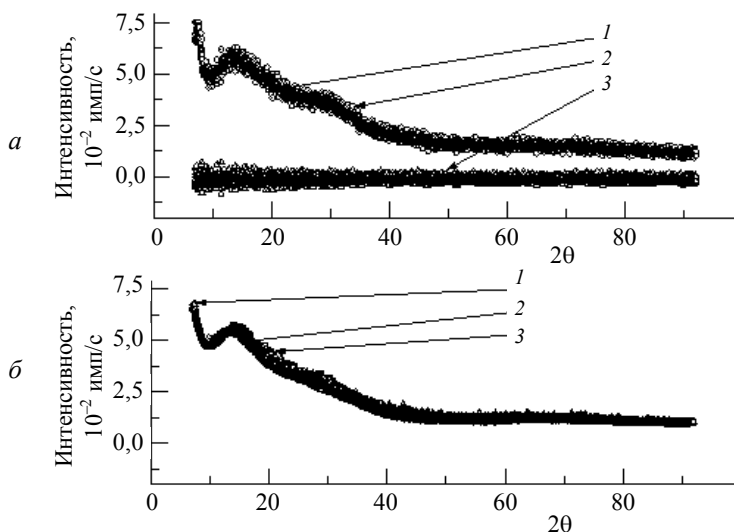
Как видно из рисунка, для исследуемого состояния наблюдается хорошее совпадение суммарных (расчетных) и экспериментальных дифрактограмм. Об этом же свидетельствуют значения критериев сходимости, приведенные в табл. 1.

*Таблица 1*

### **Критерии сходимости и суммарная расчетная интенсивность фаз**

Состояние сырья	$R_{wp}, \%$	$R_p, \%$	Интенсивность, %
Аморфное	5,68	4,35	98,54

Как видно из табл. 1, относительная разница между суммарной и экспериментальной интенсивностями оказывается около и менее 7 %.



Количественный фазовый анализ хвостов обогащения сырья в аморфном состоянии:

*a* – приведены: суммарная дифрактограмма (1); экспериментальная дифрактограмма (2); разность между суммарной и экспериментальной дифрактограммами (3); *б* – приведены фазы:  $O_2Si$  (1);  $O_{22}Al_{20}$  (2);  $O_{192}Si_{96}$  (3)

Анализировались все карточки базы COD с исходными оксидами  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и  $CaO$ . Качественный фазовый анализ показал, что найденные эталонные фазы из COD не удовлетворяют высоким требованиям сходимости суммарной и экспериментальной дифрактограмм. С помощью молекулярной динамики моделировались аморфные фазы из исходных оксидов  $O_{22}Al_{20}$  (номер в COD: 96-120-0016) и  $O_2Si$  (96-901-3494\_A) эталонной базы. Были определены оксиды  $O_{22}Al_{20}$  и  $O_2Si$ , которые в дальнейшем использовались для определения количественного состава рудного сырья. Необходимо отметить, что при моделировании оксидов были установлены плотности элементарных ячеек, при которых решетка является оптимизированной, а ее энергия в рамках молекулярной динамики (МД) минимальной. Плотность ячейки, соответствующая минимуму энергии, определяет размер прямоугольного ящика, в котором сосредоточено пространственное распределение атомов. Для аморфных фаз с известными относительными координатами атомов в ящике известных размеров можно определить структурный фактор и, соответственно, вычислить теоретическую дифрактограмму. Для указанных оксидов была выбрана примитивная элементарная ячейка. Модельные аморфные фазы  $O_{22}Al_{20}$ ,  $O_2Si$  были в дальнейшем использованы для количественного фазового состава хвостов обогащенных руд.

Результаты структурного анализа представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, оксиды  $O_{22}Al_{20}$  и  $O_2Si$ , как и в исходном состоянии, вносят основной вклад в расчетную интегральную интенсивность. В аморфном состоянии к числу основных фаз относятся также  $O_{192}Si_{96}$  (карточка № 96-720-2758) и  $O_{240}Si_{120}$  (карточка № 96-210-0336). Для оксида

$O_{192}Si_{96}$  была вычислена дифрактограмма, которая приведена на рисунке. Как видно из рисунка, на графике интенсивности фазы  $O_{240}Si_{120}$  (кривая 3) также отсутствуют рефлексы. Примитивная элементарная ячейка фазы  $O_{192}Si_{96}$  состоит из 192 атомов кислорода O и 96 атомов Si. А элементарная ячейка  $O_{240}Si_{120}$  – из 240 атомов кислорода O и 120 атомов кремния Si. Ожидается, что внутреннее строение оксидов  $O_{192}Si_{96}$ ,  $O_{240}Si_{120}$ ,  $O_{22}Al_{20}$  и  $O_2Si$  соответствует аморфным состояниям. Аморфные фазы  $O_{192}Si_{96}$  и  $O_{240}Si_{120}$  были использованы из базы данных COD, и для них были известны структурные данные, а также весовые плотности элементарных ячеек. В табл. 2 приведены уточненные размеры решетки фаз и пространственная группа. В табл. 2 приведены уточненные методом Ритвельда структурные данные перечисленных оксидов, которые определяют основной фазовый состав рудного сырья в аморфном состоянии.

Таблица 2

**Количественный фазовый анализ, аморфное состояние**

Номер карточки, фазы	Интенсивность, %	Весовая доля, %	$a$ (Å)	$b$ (Å)	$c$ (Å)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Простр. группа
$O_{22}Al_{20}$	14,24	12,55	13,7178	10,8519	13,1051	76,97	90,69	76,73	P1 (1)
$O_2Si$	32,95	31,015	13,4006	16,3459	13,0115	78,76	91,81	70,82	P1 (1)
$O_{192}Si_{96}$	38,46	45,40	14,4879	10,0431	42,9594	89,94	90,11	90,35	P1 (1)
$O_{240}Si_{120}$	12,59	11,01	13,8026	13,8026	41,5552	90,00	90,00	120,00	R-3 (148)
$O_{12}Si_6$	0,30	0,002	4,9964	4,9964	5,3206	90,00	90,00	120,00	P622 (177)

Таким образом, список фаз в табл. 2 определяет основной состав и количественное содержание рудного сырья в аморфном и отожженном состояниях. В фазовом составе хвостов обогащения молибденовых руд существенную долю составляют оксиды  $O_{22}Al_{20}$  и  $O_2Si$ , полученные в результате имитационного моделирования в рамках молекулярной динамики.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пат. 2344093. Российская Федерация, МПК51 C03B 37/04. Установка для получения минеральных волокон / О.Г. Волокитин, А.А. Никифоров, Н.К. Скрипникова ; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 5 с.
2. Полнопрофильный рентгеноструктурный анализ клинкерного минерала C4AF / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов, Д.А. Афанасьев // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 4. – С. 200–209.
3. Физические основы рентгеноструктурного исследования кристаллических материалов / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потекаев, О.Г. Волокитин, В.Д. Клопотов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 263 с.

## REFERENCES

1. *Pat. Rus. Fed. N 2344093 IPC 51 S03B 37/04. Ustanovka dlya polucheniya mineral'nykh volokon* [Installation for mineral fiber production]. O.G. Volokitin, A.A. Nikiforov, N.K. Skripnikova. Publ. 20.01.2009, Bul. No. 2. 5 p. (rus)
2. *Klopotov, A.A., Abzaev, Yu.A., Potekaev, A.I., Volokitin, O.G., Klopotov, V.D. Polnoprofil'nyi rentgenostrukturnyi analiz klinkernogo minerala S4AF* [Full-profile X-ray diffraction analysis of brick mineral C4AF]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. No. 4, 2012. Pp. 200–209. (rus)
3. *Klopotov, A.A., Abzaev, Yu.A., Potekaev, A.I., Volokitin, O.G., Klopotov, V.D. Fizicheskie osnovy rentgenostrukturnogo issledovaniya kristallicheskikh materialov* [Physical basics of X-ray diffraction analysis of crystalline materials]. Tomsk: TPU Publishing House, 2013. 263 p. (rus)

УДК 622.733:537.064.32

*САФРОНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
v.n.safronov@mail.ru  
КУГАЕВСКАЯ СОФЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА, ст. преподаватель,  
somana@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМАХ ПОДГОТОВКИ ЦИКЛОВОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ**

В статье сформулированы эффективные направления и рациональные технологические приемы подготовки цикловой магнитной активации воды затворения минеральных вяжущих гидравлического твердения. Оптимизированы свойства цементных композитов при базовых технических решениях конструктивного исполнения устройств цикловой магнитной обработки водных растворов с различным химическим составом. Рассмотрены особенности течения физических процессов при цикловой магнитной активации водных растворов и возможности их применения при подготовке цементных композитов.

**Ключевые слова:** магнитная активация; вода затворения; цемент; бетонная смесь; бетон; цикл активации; технологический прием; свойства; композит; электрический потенциал.

*VLADIMIR N. SAFRONOV, PhD, A/Professor,  
v.n.safronov@mail.ru  
SOF'YA A. KUGAEVSKAYA, Senior Lecturer,  
somana@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES AT DIFFERENT MAGNETIC ACTIVATION TECHNIQUES OF MIXING WATER**

The paper presents the efficient techniques of cycle magnetic activation of mixing water used for hydraulically settable cement pastes. Properties of cement composites were improved by a basic-design equipment for cycle magnetic activation of water solutions having various chemical compositions. The paper describes physical processes occurred at magnetic activation of water solutions and a possibility of using these solutions in making cement composites.

**Keywords:** magnetic activation of water; mixing water; cement; concrete mixture; concrete; activation cycle; technique; properties; composite; electric potential.

Создание инновационных технологий при наличии оптимальных энергетических и материальных ресурсах в строительной индустрии сопряжено

с расширением фундаментальных и прикладных исследований в области строительного материаловедения, с получением нового класса строительных материалов – активированных композитов и их компонентов. Последнее в значительной степени связывается с развитием электрофизических технологий активации. Среди широкого спектра подобного рода технологий практически важной является магнитная технология обработки воды затворения и ее разновидности при одновременном воздействии электрических и электромагнитных полей [1–4].

В Томском государственном архитектурно-строительном университете разработана технология цикловой магнитной активации воды затворения, в которой после каждого единичного цикла магнитной обработки вода подвергается воздействию воздушной среды [5, 6]. Проведенный комплекс исследований по применению данной технологии активации воды для получения матриц различных типов показал повышение качества композиционных материалов на основе керамических матриц [7], матриц на основе сульфатно-кальциевых отходов [8], органоминеральных матриц на основе торфа [9].

Обнадеживающими являются результаты фундаментальных и прикладных исследований цементных композиций, приготовленных на воде затворения, обработанной по цикловой магнитной активации [10–12].

Достигнутый уровень научных результатов и практическая их значимость позволяют сформулировать эффективные направления и рациональные технологические приемы подготовки цикловой магнитной активации воды затворения минеральных вяжущих воздушного и гидравлического твердения:

- оптимизация временного фактора цикловой магнитной активации воды при различных временах обработки и выдержки ее затворения;
- цикловая магнитная активация воды и водных растворов, содержащих в своем составе газообразные, жидкие и твердые добавки;
- цикловая магнитная активация водных растворов с нарушенной структурой разного химического состава;
- комбинированные технологии подготовки воды затворения, основу которых составляет цикловая магнитная активация;
- оптимизация технических решений конструктивного исполнения опытного образца и режимов при реализации цикловой магнитной активации.

Выбор оптимального технического решения конструктивного исполнения устройств цикловой магнитной активации воды затворения для выхода из стадии научных исследований к проведению опытно-конструкторских работ связывается нами с нижеследующими вариантами базовой реализации:

- цикловая магнитная обработка каждого единичного объема воды затворения;
- последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и отсутствии промежутка между ними;
- последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и наличии промежутка между ними.

При проведении исследований в качестве объектов цикловой магнитной обработки приняты водные растворы с различным химическим составом,

в частности, по содержанию активного кислорода и свободного диоксида углерода. Количество циклов активации составляло 0–25 с шагом 5 циклов. Магнитная индукция устройства активации в центре рабочего зазора составляла 40 мТл.

Для принятых вариантов цикловой магнитной активации воды затворения результаты испытания на прочность образцов в 90-суточном возрасте твердения в нормальных условиях приведены на рис. 1.

Обобщенными результатами исследований является установление волнового характера изменения прочности цементного камня от количества циклов омагничивания при принятых вариантах технических решений конструктивного исполнения устройств и режимов цикловой магнитной активации объектов обработки. При цикловой магнитной активации каждого единичного объекта водных растворов затворения (рис. 1, а), содержащих в негазированной артезианской воде активный кислород и в газированной гидрокарбонатной магниевой-натриевой воде свободный диоксид углерода, зависимости прочности цементного камня от количества циклов обработки идентичны. При последовательной цикловой магнитной активации при отсутствии воздушных зазоров между устройствами магнитной обработки (рис. 1, б) и его наличии (рис. 1, в) эти зависимости претерпевают изменения. Обращает на себя внимание факт превышения хода зависимостей прочности цементного камня, приготовленного на активированной воде со значительным содержанием свободного диоксида углерода, по сравнению с зависимостями прочности цементного камня, приготовленного на активированной воде с содержанием кислорода, во всем диапазоне количества циклов активации и при всех принятых технических решениях устройств цикловой магнитной обработки воды. Данное превышение подтверждает ранее установленное положение о том, что объект активации при его цикловой магнитной обработке подобен дисперсной системе класса Г/Ж (Г – дисперсная фаза газ; Ж – дисперсионная среда жидкость) с регулируемой удельной поверхностью раздела фаз в процессе активации и изменением электрического потенциала среды [11].

Для принятых технических решений конструктивной реализации цикловой магнитной активации воды затворения дана оценка качества по прочности цементных композитов, затворенных на активированной водопроводной воде. При оценке качества образцов цементных композитов принят дифференциальный метод сопоставления единичных показателей качества по прочности.

В качестве относительного показателя качества принята величина  $q$ , определяемая по формуле

$$q = R_i/R_{i6} \quad (1)$$

или 
$$q = R_{i6}/R_i, \quad (2)$$

где  $R_i$  – значение единичного показателя качества по прочностям активированных образцов в конкретном режиме цикловой магнитной обработки воды затворения;  $R_{i6}$  – значение соответствующего единичного базового показателя качества по прочности.

Для оценки выбирают отношение показателей, при котором увеличение  $q$  отражает улучшение качества. Если все относительные показатели по дан-

ному критерию качества  $q > 1$ , то уровень качества активированного композита не ниже базового, если же все или часть относительных показателей  $q < 1$ , то уровень качества ниже базового. В качестве последнего в наших исследованиях приняты значения качества контрольной серии образцов.

На рис. 2 приведены изменения дифференциального показателя качества цементного камня для трех исследуемых технических решений реализации цикловой магнитной активации. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об улучшении качества цементных композитов в ряду «цикловая магнитная обработка каждого единичного объема воды затворения» (рис. 2, кривая 3) – «последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и отсутствии воздушного зазора между ними» (рис. 2, кривая 2) – «последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и наличии воздушного зазора между ними» (рис. 2, кривая 1). Установленная экспериментально закономерность убедительно подтверждается данными (рис. 3) при цикловой активации артезианской негазированной питьевой воды, обогащенной кислородом, т. е. содержащей в большей части синглетный кислород ( $O_s$ ). При создании макетного образца-модуля большей производительности на стадии опытно-конструкторских работ следует принять третью технологическую схему реализации цикловой магнитной активации воды затворения минеральных вяжущих и бетонных смесей.

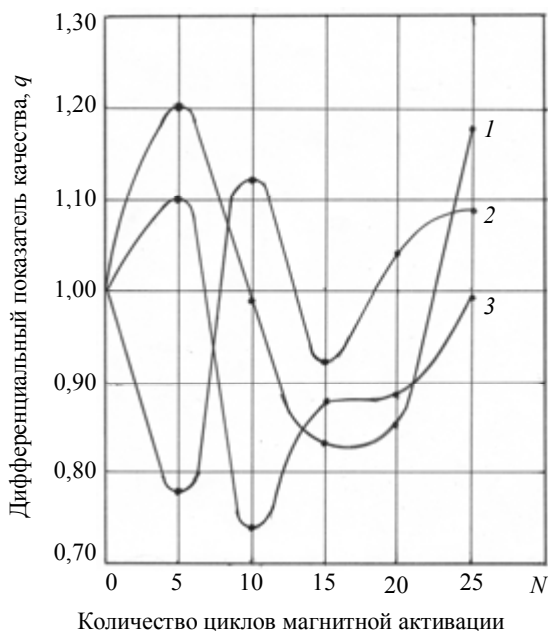


Рис. 2. Зависимость показателя качества по прочности цементного камня при различных технологических приемах и циклах активации воды затворения:  
1 – схема рис. 1, в; 2 – схема рис. 1, б; 3 – схема рис. 1, а

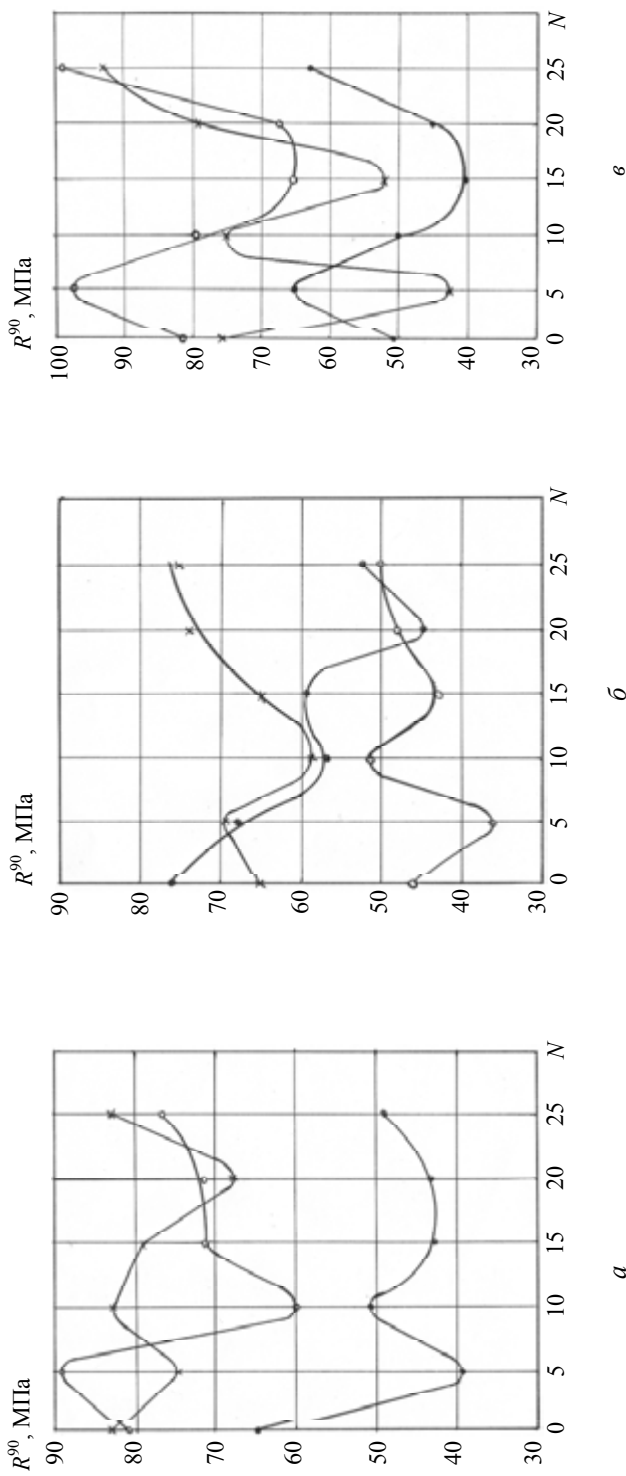


Рис. 1. Зависимость прочности цементного камня от количества циклов магнитной активации воды затворения при различных технологических схемах обработки:  
*а* – цикловая магнитная обработка каждого единичного объема воды затворения; *б* – последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и отсутствии воздушного промежутка между ними; *в* – последовательная цикловая магнитная обработка при вертикальном расположении единичных устройств активации и наличии воздушного промежутка между ними; *о* – вода водопроводная питьевая; *●* – вода питьевая артезианская с активным кислородом (9–15 мг/л); *×* – вода природная минеральная гидрокарбонатная магниево-натриевая газированная (свободный  $\text{CO}_2$  2409 мг/л)

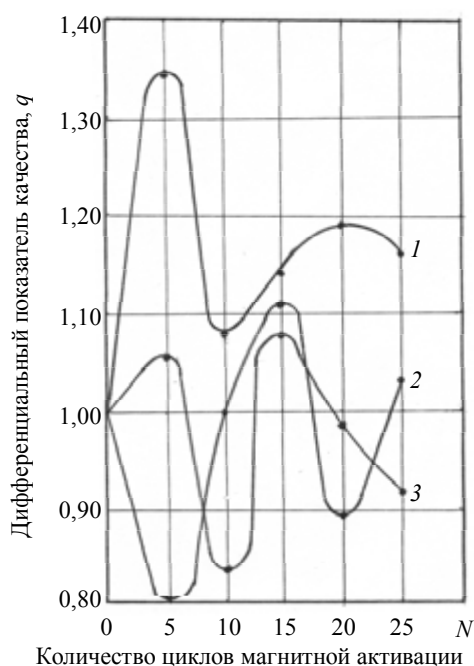


Рис. 3. Зависимости показателя качества по прочности цементного камня при различных технологических схемах и циклах активации артезианской негазированной питьевой воды, обогащенной кислородом:  
 1 – схема рис. 1, в; 2 – схема рис. 1, б; 3 – схема рис. 1, а

Разновидности конструкций устройств цикловой магнитной активации воды затворения определяются типом объекта обработки, их назначением и применением добавок различного агрегатного состояния, а также целевым последующим использованием активированной воды или водной суспензии.

В основу их разработки и создания закладывают принципиально новые решения, не имеющие аналога, совмещение новых и известных конструктивных решений, модификацию известных технических решений.

Независимо от принятой конструкции устройств цикловой магнитной активации воды затворения, реализующей оптимальную технологическую схему магнитной обработки, целесообразно принять следующую последовательность основных этапов. Экспериментально установить базовый интервал изменения цикловой обработки воды затворения минеральных вяжущих и характер изменения прочности микробетона (цементного камня). Установить закон подобия и идентичность основных закономерностей и свойств микробетона с изменением технологической схемы реализации цикловой магнитной активации воды затворения с увеличением масштабного фактора активируемого объекта и принятого типа бетона.

На рис. 4 приведен характер изменения прочности цементного камня в диапазоне количества циклов активации 0–25 с шагом 5 циклов при постоянстве водоцементного отношения. Из данных рис. 6 видно, что зависимости прочности активированных образцов цементного камня от количества циклов

активации, для всех принятых типов цементов, носят волновой характер. Обращает на себя внимание наличие максимальных значений прочности цементного камня в диапазоне количества циклов обработки 0–25 для всех принятых типов вяжущих. Данные значения прочностей цементных образцов превышают прочностей образцов контрольной серии (неактивированные) соответственно для каждого типа вяжущего. Аналогичные закономерности имеют место и при водоцементных отношениях, равных 0,35 и 0,45.

Проведенные исследования по оценке роли временного фактора активации в сопоставимых условиях и сохранению закона подобия свойств с увеличением масштабного фактора объекта исследований представлены в графической форме на рис. 5. Из данных рис. 5 следует, что максимальные значения прочностей как цементного камня на основе двух типов вяжущих, так и мелкозернистого бетона на основе портландцемента М500-Д0 получены при одинаковом количестве циклов активации водопроводной воды затворения, равном 15. Углубленные исследования по оценке прочности микробетона и мелкозернистого бетона, приготовленных с применением для этих целей активированной по цикловой магнитной обработке артезианской негазированной, обогащенной кислородом воды затворения, приведены в табл. 1.

Данные рис. 7 и табл. 1 явно свидетельствуют о сохранении подобия прочностных свойств твердеющих композитов цементного камня и мелкозернистого бетона при вариации режимов цикловой магнитной активации воды затворения. Это дает основание осуществлять оптимизацию режимов цикловой магнитной активации воды затворения при получении цементного камня с последующей рекомендацией этих режимов активации воды затворения при подготовке бетонных смесей.

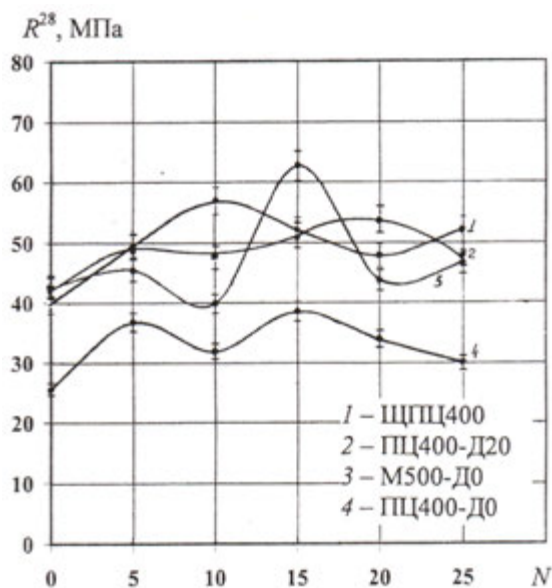


Рис. 4. Зависимость прочности цементного камня от количества циклов магнитной активации при различных типах цементов и постоянном водоцементном отношении 0,4

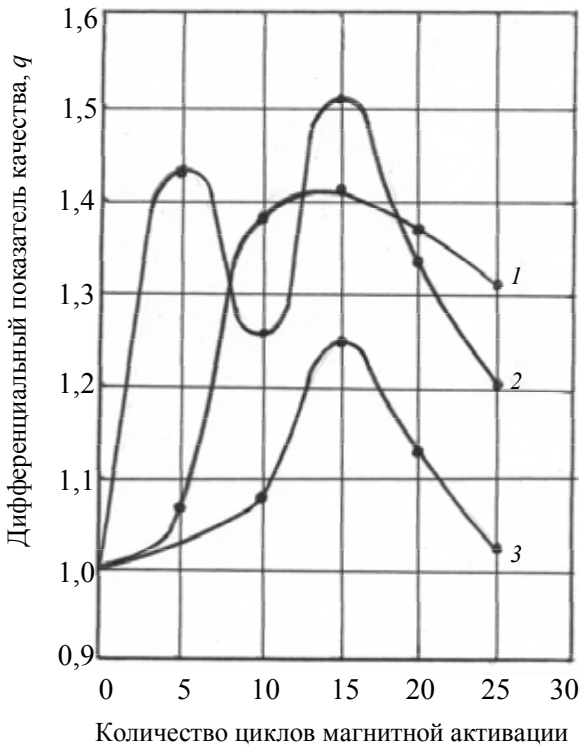


Рис. 5. Изменение показателя качества по прочности цементного камня и мелкозернистого бетона от количества циклов магнитной обработки воды затворения:  
1 – для мелкозернистого бетона; 2 – для ПЦ400-Д0; 3 – для ПЦ500-Д0

Таблица 1

**Прочность цементного камня и мелкозернистого бетона при различном количестве циклов магнитной активации воды затворения негазированной, обогащенной кислородом**

Номер режима	Количество циклов магнитной обработки воды	Прочность цементного камня, МПа	Прочность мелкозернистого бетона, МПа
1	0	56,5	25,7
2	5	58,2	30,4
3	10	53,0	25,5
4	15	60,3	30,8
5	20	64,5	32,0
6	25	60,1	30,2

Следует отметить, что приведенные выше экспериментальные данные графиков и таблиц по изменению прочности цементного камня и мелкозернистого бетона в диапазоне количества циклов магнитной активации 0–25 получены для режимов, реализующих активированную воду с временем ее выдержки до затворения, равным нулю.

Результаты экспериментальных исследований по влиянию времени выдержки воды затворения после активации для различных твердеющих композиций приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Влияние времени выдержки активированной воды затворения и ее повторной обработки по цикловой технологии на прочность цементного камня**

Вид цемента	Количество циклов магнитной обработки воды затворения	Относительный показатель качества ( $q$ ) по прочности цементного камня при различном времени выдержки до затворения, ч					
		0	1	2	3	24	48
ПЦ500-Д0	15	1,00	1,08	1,10	1,24	1,22	1,29
ПЦ500-Д0 – затворение водой, прошедшей повторную активацию	15 + повторная 15 циклов	1,00	–	–	1,21	1,23	1,30
ПЦ400-Д20	10	1,00	1,02	1,08	1,20	1,10	1,15
ПЦ400-Д20 – затворение водой, прошедшей повторную активацию	10 + повторная 10 циклов	1,00	–	–	1,19	1,09	1,14
Значение единичного базового показателя качества по прочности цементного камня равно прочности активированных образцов при количестве циклов магнитной активации 15 и 10 для затворения ПЦ500-Д0 и ПЦ400-Д20 соответственно с нулевой выдержкой после обработки до затворения							

Результаты оценки прочностных свойств цементного камня и мелкозернистого бетона при различном времени выдержки активированной воды затворения приведены в табл. 3. Значения относительных показателей ( $q$ ) прочности приняты при базовом показателе, равном прочности контрольных (при неактивированной воде) серий твердеющих композиций.

Таблица 3

**Показатель качества по прочности цементных композитов различного геометрического размера**

Наименование твердеющей композиции	Относительный показатель качества по прочности цементного камня и мелкозернистого бетона ( $q$ ) при различном времени выдержки до затворения, ч						
	0	1	2	3	24	48	72
Цементный камень	1	1,41	1,35	1,37	1,39	1,50	1,54
Мелкозернистый бетон	1,00	1,24	1,28	1,32	1,57	1,45	1,52

Из данных табл. 2 и 3 видно, что время выдержки обработанной воды по цикловой технологии активации до затворения приводит к росту прочности

твердеющих композиций и устойчивости этого показателя при 24- и 48 часовой выдержке. Таким образом, при реализации технологии цикловой магнитной активации целесообразно введение технологического приема предварительной выдержки активированной воды до затворения.

Влияние цикловой магнитной активации воды затворения на свойства приведенных выше композитов с минеральной матрицей и на течение процессов их структурообразования связывается как с изменением свойств самого объекта обработки, так и с интенсивностью и степенью перестройки структуры, и с изменением степени гидратации цемента по твердой и жидкой фазе.

Поверхность воды представляет собой межфазную границу, отделяющую воду от других тел. Жидкая вода всегда содержится в каком-либо сосуде, где часть воды контактирует с его стенками, с поверхностью раздела «вода – воздух», тогда как другая часть воды «объемная вода» удалена от стенок сосуда. Отмечается, что вода, контактирующая со стенками или газовой фазой, так называемая пограничная вода, отличается по многим свойствам от «объемной» воды [13]. Кроме того, любая вода всегда содержит неводные компоненты, например растворенные в воде молекулы и ионы, газовые пузырьки разных размеров, включая невидимые – нанопузырьки, наночастицы различной химической природы. В результате исследований последних лет установлено, что подобные примеси наноразмерной величины существенно влияют на физические и химические свойства воды даже в исчезающе малых количествах [14].

Объем пограничной воды, формирующейся у границ раздела воды со стенками сосуда и с газовыми фазами, воды, гидратирующей присутствующими в воде примесями, может быть регулируемым и составлять значительную долю от всей воды в данной водной системе. Пограничная вода организована, в определенном понятии структурирована. Однако, в отличие от жестко структурированного льда [10], пограничная вода остается жидкой и проявляет свойства жидкокристалличности. Этим она отличается и ото льда, и от воды, с которой она непосредственно контактирует, – от значительно более аморфной «объемной» воды.

В настоящее время известно, что фундаментальным свойством водных систем, в которых существует организованная, жидкокристаллическая и аморфная вода, является наличие разности электрических потенциалов, которая может достигать долей вольт. При этом жидкокристаллическая вода, прилегающая к гидрофильным поверхностям, имеющая в ряде случаев толщину в десятки и сотни микрон, как правило, заряжена отрицательно, т. е. имеет избыток электронов [15]. К этому следует добавить, что согласно модели, предложенной в [16], поверхность воды имеет отрицательный электрический потенциал, обусловленный накоплением гидроксильных ионов  $\text{OH}^-$ . Противоположно заряженные ионы гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$  притягиваются к отрицательно заряженной поверхности воды, формируя двойной электрический слой. По этой причине мелкие газовые включения, взвешенные в воде, приобретают, как правило, отрицательный заряд и взаимно отталкиваются друг от друга [17].

Исследованиями установлено, что и «объемная вода», находящаяся на значительном расстоянии от границ раздела воды со стенками и границей раздела «вода – воздух», может быть существенно неоднородной. В чистой «объемной» воде присутствуют стабильные отрицательно заряженные водные кластеры размерами от десятков нанометров до многих микрон. Такие кластеры возможно выделить из воды, т. к. они не испаряются в течение длительного времени даже в тепле [18]. Таким образом, и «объемная» вода может быть суспензией, в которой существуют два типа водных структур. Одна из этих структур представляет собой организованную жидкокристаллическую фазу, а другая – аморфную воду. Это значит, что «реальная» вода – это крайне неравновесная система, в которой между разными водными фазами всегда существуют электрические и другие градиенты.

Излагаемый ниже механизм опирается на научные взгляды профессора В.Л. Воейкова. Итак, организованная водная фаза является потенциальным донором электронов, т. е. восстановителем. Поскольку она обладает свойствами жидкого кристалла, она служит плохим растворителем даже для тех веществ, которые хорошо растворяются в воде. Эти вещества должны быть растворены в аморфной воде. Если в водной системе создаются условия для тока электронов из отрицательно заряженной водной фазы на акцепторы электронов, присутствующие в аморфной воде, потенциальная энергия, запасенная в электрических градиентах, может превратиться в свободную энергию. Последняя может быть использована для выполнения работы как внутри водной системы, так и вне ее.

В любой воде всегда присутствует растворенный кислород, являющийся универсальным окислителем. Поэтому в любой воде может в принципе осуществляться окисление жидкокристаллической воды кислородом. Окисление кислородом воды, как окисление им любого другого горючего, – это процесс, при котором электроны (атомы водорода) переносятся с окисляемого вещества, в данном случае воды, на окислитель – кислород, который при этом восстанавливается до молекул воды:



В ходе последовательного восстановления кислорода электронами образуются суточные малоустойчивые, короткоживущие соединения, обладающие высокой химической активностью. Эти продукты представляют собой свободные радикалы, перекиси, и в совокупности их называют «активные формы кислорода» (АФК). В реакциях с участием АФК освобождаются крупные порции (кванты) энергии, которые эквивалентны квантам ближнего инфракрасного, видимого и даже УФ-света. Последовательное присоединение к молекуле кислорода четырех атомов водорода, по ходу которого появляются и исчезают АФК, – это его полное восстановление до двух молекул воды. При этом на каждую восстановленную молекулу кислорода освобождается в общей сложности 8 электрон-вольт энергии [19].

Такая реакция может осуществляться только в системе, в которой сосуществуют служащая донором электронов организованная (низкоэнтропийная) водная фаза – жидкокристаллическая вода ( $\text{H}_2\text{O}$  в левой части уравнения), служащая растворителем для кислорода, и высокоэнтропийная вода ( $\text{H}_2\text{O}$

в правой части уравнения), в которой растворен кислород и которая обогащена протонами, нейтрализующими электроны. Энергия, таким образом, освобождается за счет разрушения организованной воды и увеличения энтропии в системе. Если условия для регенерации жидкокристаллической воды при ее горении сохраняются, то процесс приобретает циклический характер. Однако обычный молекулярный кислород весьма инертен, и чтобы процесс окисления воды стал осуществляться эффективно, требуется приток энергии активации, например, в виде освещения, и/или присутствие катализаторов, снижающих энергетический барьер для горения воды.

Роль такого рода катализаторов могут играть присутствующие в воде различные формы уголекислоты ( $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-}$ ). С одной стороны, они способствуют дополнительному структурированию воды, увеличивая разность потенциалов между двумя фазами, с другой – катализируют окисление воды благодаря своей способности участвовать в свободно-радикальных реакциях. Так, в присутствии подходящих доноров электронов одноэлектронное восстановление  $\text{CO}_2$  до анион-радикала двуокиси углерода ( $\text{CO}_2^{\bullet-}$ ) является термодинамически выгодным. Этот радикал является сильным восстановителем, и он может восстанавливать кислород, выступая в роли «челнока» между водной фазой, служащей донором электронов, и присутствующим в воде кислородом. С другой стороны, один из продуктов одноэлектронного окисления воды – гидроксил-радикал ( $\text{HO}\bullet$ ) – легко окисляет бикарбонатный анион до карбонат-анион радикала ( $\text{CO}_3^{\bullet-}$ ). Последний способствует окислению воды и перекиси водорода. Возникает сеть сопряженных и стабилизирующих друг друга окислительно-восстановительных реакций, в ходе которых генерируется энергия электронного возбуждения. Все эти процессы имеют циклический характер, и при их протекании в замкнутой системе не происходит расходования реагентов – воды, кислорода и уголекислоты. Реакции с участием АФК и активных форм уголекислоты сопровождаются выделением энергии высокой плотности световых фотонов, и если «горение» воды действительно имеет место, то оно должно сопровождаться появлением излучения большей или меньшей интенсивности [20].

Интенсивность протекающих в воде окислительно-восстановительных процессов, определяющая энергонасыщенность (активность) воды, может изменяться в достаточно широких пределах. Она зависит от ее солевого состава, наличия в воде наночастиц и нанопузырьков, структурирующих водную систему, от предыстории водной системы, например, воздействия на нее механических, магнитных, электромагнитных полей. Следует отметить, что энергонасыщенность пограничной и внутренней воды также различна. По данным А.А. Назарова, даже в объеме стакана один из типов воды имел энергонасыщенность внутренней воды 40 кДж/моль, а пограничной, толщиной слоя 0,3 микрона, – 60 кДж/моль.

В технологии цикловой магнитной активации воды затворения, независимо от ее типа, одновременно происходит привнесение в объект обработки дополнительного кислорода и воздействие магнитного поля, что стимулирует течение процессов по приведенному выше механизму с изменением энергонасыщенности воды в процессе обработки и выдержки ее после активации.

Полученные результаты исследования свойств цементных композиций и оптимизация технологических приемов цикловой магнитной активации воды затворения в конструктивно различных условиях ее обработки позволяют утверждать, что определение рациональных технологических приемов цикловой магнитной активации воды затворения и свойств цементных композитов следует осуществлять на стадии исследований свойств цементного камня с последующим прямым переносом для подготовки бетонных смесей принятого технологического приема активации и оптимальных режимов.

При реализации цикловой магнитной активации целесообразно использование технологического приема предварительной выдержки активированной воды до затворения.

Применение технологии цикловой магнитной активации воды затворения как инструмента для производства обновленных или совсем новых товаров в строительной индустрии возможно путем передачи данной разработки на существующие промышленные предприятия и создания автономных предприятий малого бизнеса с организацией поставки своей продукции на рынок строительных товаров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Помазкин, В.А. Магнитоактивированная вода в строительных технологиях / В.А. Помазкин, А.А. Макеев // Вестник ОГУ. – 2001. – № 1. – С. 109–114.
2. Гульков, А.Н. Применение магнитной обработки воды на предприятиях Дальнего Востока / А.Н. Гульков, Ю.А. Заславский, П.П. Ступаченко. – Владивосток : Изд-во Дальневосточного ун-та, 1990. – 134 с.
3. Композиционные строительные материалы на активированной воде затворения / В.Т. Ерофеев, А.А. Матвиевский, А.К. Осипов [и др.] // Строительные материалы. – 2007. – № 11. – С. 56–57.
4. Кинетический анализ процессов структурообразования в активированной системе «цемент – вода» / Н.П. Горленко, Е.Б. Чернов, Ю.С. Саркисов [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 2. – С. 147–153.
5. Сафронов, В.Н. Технология цикловой магнитной обработки воды затворения в производстве строительных материалов / В.Н. Сафронов, С.А. Кугаевская // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов: сб. трудов Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПДЗ, 2008. – С. 190–193.
6. Цикловая магнитная активация газонаполненных жидких сред затворения цементных систем / В.Н. Сафронов, Ю.С. Саркисов, С.А. Кугаевская [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4. – С. 89–99.
7. Safronov, V.N. Untersuchung des Einflusses einer magnetischen Behandlung auf die Eigenschaften keramischer Materialien / V.N. Safronov, S.N. Sokolova // Keramische zeitschrift. – 2005. – № 1. – S. 10–13.
8. Zur Eigenschaftsbeeinflussung bei der Herstellung von Baumaterialien unter Verwendung von Fluoranhidrit / A.D. Kudiakov, L.A. Anikanova, V.N. Safronov [etc.] // Internationale Baustofftagung (Ibausil). Tagungsbericht. – 2006. – B. 1. – S. 749–758.
9. Формирование структур твердения в системе «низинный торф – активированная вода» / Н.О. Копаница, М.А. Ковалева, В.Н. Сафронов [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 2. – С. 111–120.
10. Сафронов, В.Н. Цикловая магнитная активация жидких сред затворения с нарушенной структурой различного химического состава / В.Н. Сафронов, С.А. Кугаевская, Е.В. Румянцева // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 3. – С. 133–142.

11. Сафронов, В.Н. Временной фактор в технологии цикловой магнитной активации воды затворения минеральных вяжущих / В.Н. Сафронов, С.А. Кугаевская // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1. – С. 163–171.
12. Влияние магнитной активации на свойства сред затворения и прочность цементного камня на их основе / В.Н. Сафронов, С.А. Кугаевская // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. трудов Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПДЗ, 2011. – С. 111–114.
13. *Surfaces and interfacial water: evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact* / J.M. Zheng, W.C. Chin, E. Khijniak [etc.] // *Adv Colloid Interface Sci.* – 2006. – V. 127. – P. 19–27.
14. *The effect of rf-irradiation on electrochemical deposition and its stabilization by nanoparticle doping* / Y. Katsir, L. Miller, Y. Aharonov [etc.] // *Journal of the Electrochemical Society*, 154[4]: D249-D259 (2007).
15. *Role of proton gradients in the mechanism of osmosis* / Q. Zhao, K. Ovchinnikova, B. Chai [etc.] // *J. Phys Chem B.* – 2009. – Aug 6. – 113 (31): 10708-14.
16. *Collaciccio, G. Electrical potential of the water surface* / G. Collaciccio // *Chemica Scripta.* – 1988. – № 2. – V. 28. – P. 141–144.
17. Андреев, В.Г. Влияние поверхностного потенциала воды на реологические свойства дисперсных систем / В.Г. Андреев // Книга докладов Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2004. – С. 385–386.
18. Lo, S.Y. Evidence for the existence of stable-water-clusters at room temperature and normal pressure / S.Y. Lo, X. Geng, D. Gann // *Physics Letters A.* – 2009. – V. 373. – P. 3872–3876.
19. Воейков, В.Л. Ключевая роль устойчиво неравновесного состояния водных систем в биоэнергетике / В.Л. Воейков // Российский химический журнал (Журнал РХО им. Д.И. Менделеева). – 2009. – Т. LIII. – № 6. – С. 41–49.
20. *Активированные перекисью водорода водные растворы бикарбонатов – долговременные источники низкоинтенсивного излучения, реагирующие на слабые и сверхслабые воздействия* / Д.М. Ха, О.Г. Мухитова, Н.Д. Виленская [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2011. – № 2. – С. 28–38.

#### REFERENCES

1. Pomazkin, V.A., Makeev, A.A. Magnitoaktivirovannaya voda v stroitel'nykh tekhnologiyakh [Magnetically activated water in construction technologies]. *Vestnik of OSU. Orenburg* : Orenburg State University, 2001. No. 1. Pp. 109–114. (rus)
2. Gul'kov, A.N., Zaslavskii, Yu.A., Stupachenko, P.P. Primenenie magnitnoi obrabotki vody na predpriyatiyakh Dal'nego Vostoka [Magnetic water treatment at Far East enterprises]. Vladivostok : Izd-vo Dal'nevostochnogo un-ta [Far Eastern Federal University Publ.], 1990. 134 p. (rus)
3. Erofeev, V.T., Matvievskii, A.A., Osipov, A.K., et al. Kompozitsionnye stroitel'nye materialy na aktivirovannoi vode zatvoreniya [Composite building materials based on activated mixing water]. *Construction Materials*. 2007. No. 11. Pp. 56–57. (rus)
4. Davydova, N.G., Sarkisov, Yu.S., Gorlenko, N.P., Chernov, Ye.B. Kineticheskiy analiz protsessov strukturoobrazovaniya v aktivirovannoy sisteme «Tsement–voda» [Kinetic analysis of structurization in activated system "Cement–Water"]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 2. Pp. 147–153. (rus)
5. Safronov, V.N., Kugaevskaya, S.A. Tekhnologiya tsiklovoi magnitnoi obrabotki vody zatvoreniya v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Cycle magnetic activation technology for mixing water used in construction material production]. *Coll. Papers Int. Sci. Tech. Conf. 'High energy- and resource-efficient technologies in building material production'*. Penza : PDZ, 2008. Pp. 190–193. (rus)
6. Safronov, V.N., Sarkisov, Yu.S., Kugaevskaya, S.A. Tsiklovaya magnitnaya aktivatsiya gazonapolnennykh zhidkikh sred zatvoreniya tsementnykh sistem [Cycle magnetic activation of gas-filled mixing waters for cement pastes]. *Vestnik TSUAB*. 2009. No. 4. Pp. 89–99. (rus)

7. Safronov, V.N., Sokolova, S.N. Untersuchung des Einflusses einer magnetischen Behandlung auf die Eigenschaften keramischer Materialien. *Keramische zeitschrift*. 2005. No. 1. Pp. 10–13.
8. Kudiakov, A.D., Anikanova, L.A., Safronov, V.N. et al. Zur Eigenschaftsbeeinflussung bei der Herstellung von Baumaterialien unter Verwendung von Fluoranhydrit. *Internationale Baustofftagung (Ibausil)*. Tagungsbericht. 2006. V. 1. Pp. 749–758.
9. Kopanitsa, N.O., Kovaleva, M.A., Safronov, V.N., et al. Formirovanie struktur tverdeniya v sisteme «nizinniy torf – aktivirovannaya voda» [Solid structure formation in ‘black peat – activated water’ system]. *Vestnik TSUAB*. 2009. No. 2. Pp. 111–120. (rus)
10. Safronov, V.N., Kugaevskaya, S.A., Rumyantseva, E.V. Tsiklovaya magnitnaya aktivatsiya zhidkikh sred zatvoreniya s narushennoy strukturoy razlichnogo khimicheskogo sostava [Cycle magnetic activation of mixing waters with disturbed structure of different chemical composition]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 3. Pp. 133–142. (rus)
11. Safronov, V.N., Kugaevskaya, S.A. Vremennoi faktor v tekhnologii tsiklovoi magnitnoi aktivatsii vody zatvoreniya mineral'nykh vyazhushchikh [Time factor in cycle magnetic activation technology of mixing water used for cementitious materials]. *Vestnik TSUAB*. 2013. No. 1. Pp. 163–171. (rus)
12. Safronov, V.N., Kugaevskaya, S.A. Vliyanie magnitnoi aktivatsii na svoystva sred zatvoreniya i prochnost' tsementnogo kamnya na ikh osnove [Magnetic activation impact on mixing water properties and strength of cement stone produced therefrom]. *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy. Teoriya i praktika: Coll. Papers Int. Sci. Tech. Conf. 'Composite building materials. Theory and practice'*. Penza : PDZ, 2011. Pp. 111–114. (rus)
13. Zheng, J.M., Chin, W.C., Khijniak, E., et al. Surfaces and interfacial water: evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2006. V. 127. Pp. 19–27.
14. Katsir, Y., Miller, L., Aharonov, Y., et al. The effect of RF-irradiation on electrochemical deposition and its stabilization by nanoparticle doping. *Journal of the Electrochemical Society*, 154[4]: D249-D259 (2007).
15. Zhao, Q., Ovchinnikova, K., Chai, B., et al. Role of proton gradients in the mechanism of osmosis. *J. Phys Chem B*. 2009. Aug 6. 113 (31): 10708-14.
16. Collacicco, G. Electrical potential of the water surface. *Chemica Scripta*. 1988. No. 2. V. 28. Pp. 141–144.
17. Andreev, V.G. Vliyanie poverkhnostnogo potentsiala vody na reologicheskie svoystva dispersnykh sistem [Water surface potential effect on rheological properties of dispersion systems]. *Proc. Int. Symp. 'Reliability and Quality'*. Penza, 2004. Pp. 385–386. (rus)
18. Lo, S.Y., Geng, X., Gann, D. Evidence for the existence of stable-water-clusters at room temperature and normal pressure. *Physics Letters A*. 2009. V. 373. Pp. 3872–3876.
19. Voeikov, V.L. Klyuchevaya rol' ustoichivo neravnovesnogo sostoyaniya vodnykh sistem v bioenergetike [The key role of steady non-equilibrium state of water systems in bioenergetics]. *Russian Journal of General Chemistry*. 2009. V. LIII. No. 6. Pp. 41–49. (rus)
20. Kha, D.M., Mukhitova, O.G., Vilenskaya, N.D., et al. Aktivirovannyye perekis'yu vodoroda vodnye rastvory bikarbonatov – dolgovremennyye istochniki nizkointensivnogo izlucheniya, reagiruyushchie na slabyye i sverkh-slabyye vozdeystviya [Bicarbonate aquatic solutions activated by hydrogen peroxide as long-term sources of low-intensive radiation responding to weak and superweak effects]. *Biomedical Radioelectronics*. 2011. No. 2. Pp. 28–38. (rus)

УДК 553.5:549.07

*МАНАНКОВ АНАТОЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, докт. геол.-мин. наук, профессор,  
mav.39@mail.ru*

*СТРАХОВ БОРИС СЕРГЕЕВИЧ, эксперт Центра независимых  
судебных экспертиз Российского фонда ТЕХЭКО,  
sbs1948@list.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОГО СЫРЬЯ ПОЛЯРНОГО УРАЛА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕТРОСИТАЛЛОВ**

Цель работы – с помощью теоретических расчетов и экспериментальных исследований получить стеклокристаллические материалы класса сикам на основе пород Полярного Урала. В процессе работы изучена петрохимия пород, рассчитаны составы и технологические параметры получения петроситаллов. Проведен расчет теоретического химического и минерального составов полученных петроситаллов. Изучены их минеральный состав, структура, текстура и физико-химические свойства.

**Ключевые слова:** Полярный Урал; сикамы; петроситаллы; нуклеаторы; дифференциально термический анализ; термограммы; эндоэффекты; экзоэффекты; кристаллы.

*ANATOLY V. MANANKOV, DSc, Professor,  
mav.39@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

*BORIS S. STRAKHOV, Expert,  
sbs1948@list.ru*

*Center for Independent Forensic Examinations of the Russian Foundation  
ТЕНЕКО*

## **PETRO-GEOCHEMICAL RESEARCH OF POLAR URALS ROCK GLASS-CERAMICS PRODUCTION**

The paper is aimed at theoretical calculations and experimental research into synthesis of glass-ceramic materials [2] based on rocks of Polar Urals. Petrochemistry of rocks was studied; compositions and technological parameters of rock glass-ceramics were calculated in this paper. A calculation of theoretical chemical and mineral compositions was provided for obtained rock glass-ceramics. Their mineral composition, structures, textures, and physico-chemical properties were studied herein.

**Keywords:** Polar Urals; rock glass-ceramic; nucleating agent; differential thermal analysis; heat patterns; endo-effects; exo-effects; crystals.

### **Предшественники ситаллов**

Первыми предшественниками ситаллов многие считают глушеные стекла. Глушением стекла называют большую или меньшую потерю его про-

зрачности. Эффект глушения вызывается весьма мелкими (около 1 мкм) частицами фазы (микроструктурами), которая выделяется в процессе формирования или после термообработки.

**Цветные стекла.** Все красители делятся на три типа: ионные, коллоидные и молекулярные. Ионные красители – оксиды переходных металлов (кобальта, никеля, марганца, хрома, кадмия, меди, железа, ванадия, церия и др.). Коллоидное окрашивание стеклу придает золото, медь, селен, сурьма, серебро. К молекулярным красителям относятся сульфиды и селениды.

**Фарфор Реомюра.** В первой половине XVIII в. известный французский физик Реомюр следующим образом объяснил образование фарфора из стекла: рост кристаллов иглообразной формы начинается с поверхности изделий; по мере увеличения кристаллов они прорастают вглубь и затем встречаются у середины стенок, после чего процесс кристаллизации завершается. Это подтверждает структура фарфора: в изломе видны тончайшие кристаллические нити, уложенные друг против друга. Но направленный рост кристаллов от стенок изделия создавал ослабленную среднюю зону, где эти кристаллы встречались.

### **Теоретический расчет и экспериментальное получение петроситаллов класса сикам на основе пород Полярного Урала**

Академик И.И. Китайгородский в середине XX в. выступил с предложением организовать широкое производство и применение в строительстве закристаллизованных стекол ситаллов. Он утверждал, что, изменяя химический состав, температуру и время термической обработки, можно регулировать ход процесса кристаллизации и влиять на образование той или иной кристаллической структуры. Последняя же, в свою очередь, обусловит необходимые физико-химические свойства полученного вещества и изделий из него [5]. Академик Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и профессор А.С. Гинзбург в 1926–1933 гг. создали известную школу по изучению свойств горных пород и промышленных шлаков с целью их использования в петрургии [1].

Официально же днем рождения ситаллов считается 23 мая 1957 г. (патент фирмы «Корнинг Гласс Уоркс» № 1298811). Разработка метода получения ситалла в результате направленной кристаллизации стекла оценивается как одно из важнейших достижений науки XX в. и приравнивается к разработке способа получения стали [1].

Кристаллизация ситалла включает в себя две стадии: образование центров кристаллизации и рост кристаллов. Образование центров может быть гомогенным и гетерогенным. Кристаллическое зерно зарождается при благоприятных условиях в каком-то микроучастке расплава или раствора.

Главную роль при зарождении центров кристаллизации играет переохлаждение. На зарождение центров влияют также силовые поля (электрические, магнитные, ионизирующие), ультразвук, стенки сосуда, дефекты соприкасающихся с жидкостью поверхностей.

В дальнейшем были получены характерные кривые температурной зависимости числа образующихся центров кристаллизации (ЧЦК) и линейной

скорости кристаллизации (ЛСК). Необходимость преодоления энергетического барьера зародышеобразования определяет медленность процессов фазовых переходов.

Кроме добавок ускорителей (минерализаторов) существуют добавки избирательного действия. Так, торможение процесса минералообразования вызывают добавки, которые носят название замедлителей, или ингибиторов; задержку модификационных превращений обеспечивают добавки, которые принято называть стабилизаторами. Эффективность действия частицы (подложки) зависит от степени соответствия ее структуры структуре зародыша: несоответствие параметров решеток обоих кристаллов не должно превышать 15 % (принцип кристаллографического подобия Данкова).

Наибольшие трудности, как теоретические, так и экспериментальные, вызывает механизм роста кристаллов из расплавов; существующие теоретические представления о механизме роста кристаллов применительно к расплавам могут рассматриваться только как качественные. Для определения побудителей объемной кристаллизации стекол существует несколько терминов: катализаторы, нуклеаторы, инициаторы, стимуляторы, зародышеобразователи и др.

В настоящее время получают большое число ситаллов разного типа в зависимости от исходного состава [2]. Все известные ситаллы можно условно разделить на две группы: технические ситаллы и ситаллы на основе промышленных отходов и горных пород.

Технические ситаллы включают в себя все искусственные композиции, получаемые на основе смесей разных соединений элементов и по типу применяемых катализаторов. По этой классификации различают способы получения ситаллов с применением благородных металлов (золото, серебро, платина), меди, фторидов,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ , переходных элементов ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{5+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ) и т. п.

В зависимости от конкретных требований к свойствам стекол (температура варки, вязкость и пр.) и ситаллов (свойства, режим термообработки и пр.) составы основных типов могут быть значительно модифицированы введением различных добавок, влияющих на варку, формование, свойства и т. п. В качестве таких добавок могут быть использованы щелочные, щелочно-земельные и другие (практически любые) оксиды.

Группа ситаллов на основе промышленных отходов и горных пород состоит в основном из шлакоситаллов и петроситаллов. Шлаковые ситаллы включают субмикроструктурные материалы на основе шлаков черной и цветной металлургии. К этой же группе относятся и ситаллы на основе различных других шлаков (фосфорное производство, золы ТЭЦ и др.). Петроситаллы включают в себя ситаллы на основе горных пород (базальтов, диабазов и др.), а также на основе отходов разных обогатительных производств (хвосты руд и пр.) [8].

Авторами в рамках НИР с технопарком «Ямал» в 2012 г. были проведены петрохимические исследования вскрышных пород золоторудных месторождений Полярного Урала на предмет получения из них петроситаллов.

В восточной части Полярного Урала в районе пос. Харп были отобраны представительные пробы из карьеров трех месторождений. С месторождения

Новогоднее были взяты образцы базальта и диабаз, с месторождения Амфиболитового – образцы амфиболитов, а также известняки с месторождения Новогоднее II (рис. 1). Месторождение Новогоднее расположено в пределах Малоуральского краевого вулcano-плутонического пояса (ВПП), прорванного интрузивными образованиями собского и конгорского комплексов. Месторождение Амфиболитовое локализовано в пределах распространения ханмейхойской свиты нижнего протерозоя.

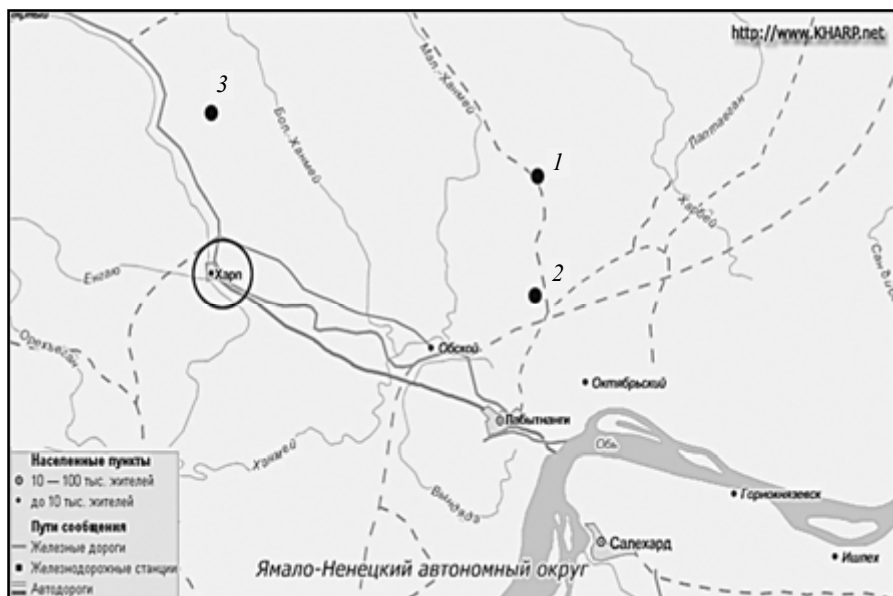


Рис. 1. Обзорная карта района пос. Харп в восточной части Полярного Урала:

1 – месторождение золота Новогоднее; 2 – месторождение известняков Новогоднее II; 3 – месторождение строительных материалов Амфиболитовое

Пробы после дробления до 1 мм и квартования были подвергнуты химическому анализу с помощью масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма» (аналитик – исследователь 1-й категории А.Н. Маковенко). В таблице приведены данные анализа в сравнении с вулканитами Томского района.

### Химический состав базитов Полярного Урала и Томского района

Оксиды	Базальт	Диабаз	Низкощелочной андезит (метаморфизованный базальт)	Нормальнощелочной андезит (амфиболитизированный базальт)	Средний химический состав дайковых форм вулканитов Томского района
SiO <sub>2</sub>	48,67	45,08	62,30	57,66	50,89

Окончание таблицы

Оксиды	Базальт	Диабаз	Низкощелочной андезит (метаморфизованный базальт)	Нормальнощелочной андезит (амфиболитизированный базальт)	Средний химический состав дайковых форм вулканитов Томского района
TiO <sub>2</sub>	0,37	0,59	1,05	0,79	1,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,93	14,85	11,98	15,14	15,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,01	8,54	3,73	2,82	6,37
FeO	6,34	7,69	5,51	4,27	5,25
MgO+MnO	5,80	7,73	3,05	3,36	4,57
CaO	11,84	9,95	5,96	5,11	7,28
Na <sub>2</sub> O	2,00	1,40	1,43	2,93	3,67
K <sub>2</sub> O	0,12	0,17	2,33	2,20	1,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,07	0,12	0,31	0,73
H <sub>2</sub> O	0,28	0,30	0,17	0,38	0,39
П.п.п.	2,31	2,74	1,26	4,21	1,18
Сумма	99,69	99,11	98,89	99,18	98,95

По минералого-петрографическим особенностям и химическому составу на диаграмме «Сумма щелочей – кремнезем» (рис. 2) породы месторождения Новогоднее попадают в поле базальтов и основных пикробазальтов. Для них характерно относительно высокое содержание железа, магния, кальция и низкое – кальция и фосфора. Амфиболиты попадают в поле низко- и нормальнощелочных андезитов. По сравнению с породами месторождения Новогоднее, при более высоком содержании кремнезема амфиболиты характеризуются более низким содержанием железа, магния и кальция, не сильно отличаются по содержанию натрия и выделяются повышенными значениями калия и фосфора.

На рис. 3 и 4 видно, что минералы базальта месторождения Новогоднее практически не изменены, а структура его не нарушена, в то время как исходная порода (предположительно базальт), по которой развивались амфиболиты,

претерпела глубокое метаморфическое изменение с почти полным замещением исходного минерального состава метаморфическими минералами, по которому наблюдается развитие вторичных минералов.

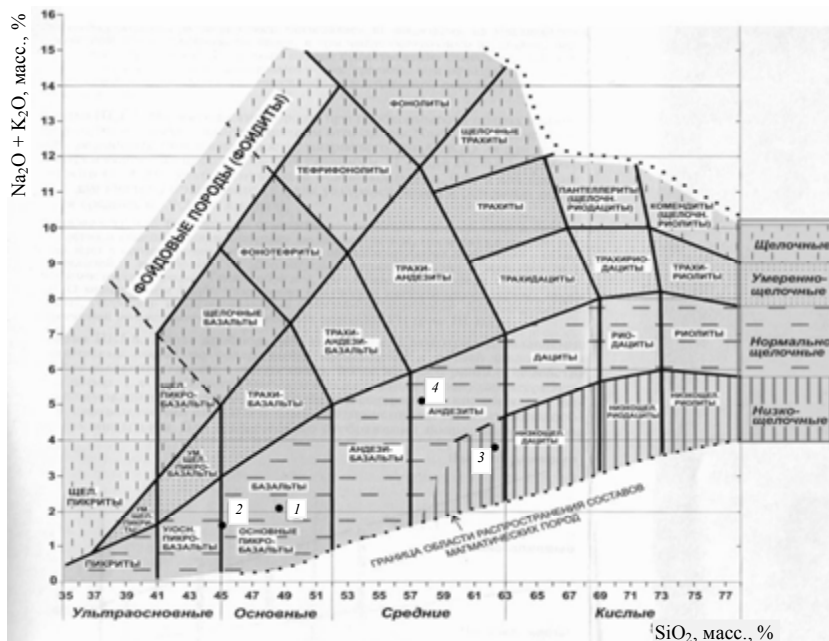


Рис. 2. Диаграмма TAS для химической классификации магматических (вулканических) горных пород:

1 – базальт; 2 – диабаз; 3 – андезит; 4 – амфиболит

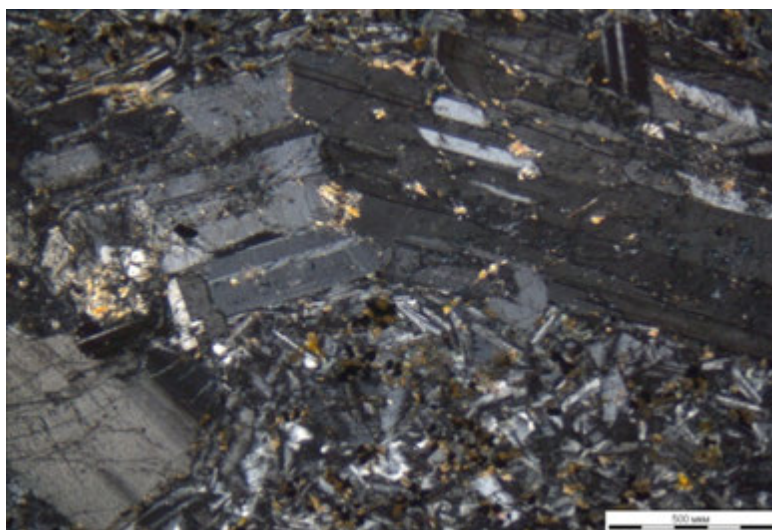


Рис. 3. Порфировая структура; вкрапленники плагиоклаза в микроаллотриоморфной массе габбро-порфирита

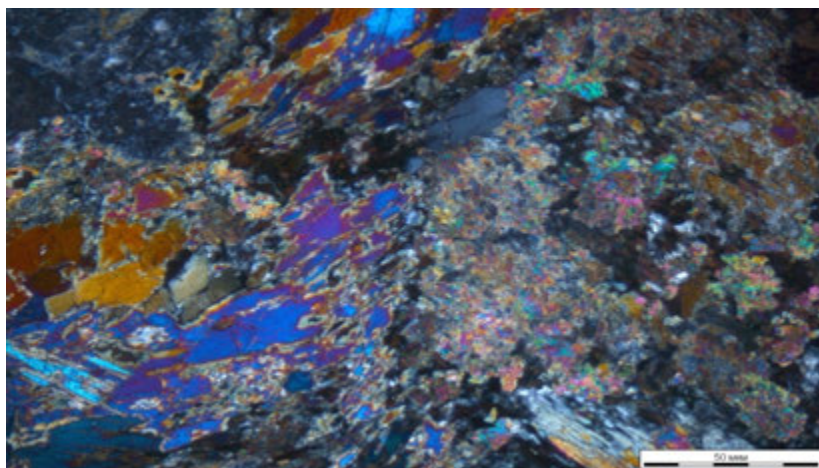


Рис. 4. Метасоматическое псевдоморфное замещение основных минералов базальта амфиболами, хлоритом и слюдами. Николи X

Для исходных пород также были выполнены анализы на редкоземельные и рассеянные элементы с помощью масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма».

Спайдер-диаграмма рассеянных элементов, нормированных на примитивную мантию, также подтверждает существенное отличие базальтов и диабазов от амфиболитов (рис. 5). В общем случае амфиболиты в большей степени обогащены рассеянными элементами по сравнению с породами месторождения Новогоднее. Последние имеют хорошо выраженные максимумы Ba, U и Sr и минимумы Th, K, Nb и Zr. Распределение рассеянных элементов в амфиболитах носит менее упорядоченный характер. Различаются по своему поведению Ba, Sr и Nb. Также имеется U-максимум. Основным отличием от пород Малоуральского ВПП является Zr [1, 3, 4, 9, 10].

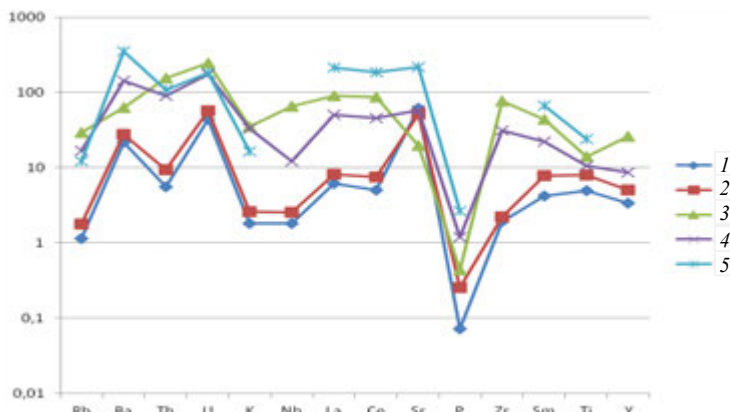


Рис. 5. Распределение рассеянных элементов в породах Полярного Урала и томских базальтах:

1–2 – базальт и диабаз Малоуральского ВПП (месторождение Новогоднее); 3–4 – амфиболиты ханмейхойской свиты (месторождение Амфиболитовое); 5 – базальты томских даек (район пос. Мирный)

Сравнивая данные результатов исследования распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) и рассеянных элементов с результатами предыдущих аналогичных исследований [1, 10], можно сделать вывод, что распределение РЗЭ и рассеянных элементов пород Малоуральского ВПП хорошо сопоставляется с содержанием этих элементов в базальтах островных дуг. В свою очередь, распределение элементов в амфиболитах указывает на возможную принадлежность исходных пород к формациям базальтов континентальных рифтов или океанических островов. Если учесть историю геологического развития, то первый вариант оказывается предпочтительней. Для его подтверждения на рис. 5 приведены тренды распределения РЗЭ и рассеянных элементов базальтов, находящихся около пос. Мирный Томского района, которые относятся к плитно-платформенной формации.

### Выводы

В ходе исследования возможности получения петроситаллов из пород трех месторождений Полярного Урала были достигнуты следующие результаты:

1) минеральный и химический состав исходных пород, откорректированный в соответствии с заданными параметрами, хорошо подходит для синтеза петроситаллов;

2) впервые получены теоретические и экспериментальные доказательства технологии производства новых конструкционных материалов петроситаллов на основе дешевого и доступного сырья Полярного Урала [6, 7, 8].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлушкин, Н.М. Основы технологии ситаллов / Н.М. Павлушкин. – М. : Стройиздат, 1979. – 360 с.
2. Мананков, А.В. Физико-химические основы наноструктурной минералогии в получении современных материалов / А.В. Мананков // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 120–136.
3. Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала / под ред. А.Ф. Морозова [и др.]. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – 274 с. + приложения на CD.
4. Бычков, Д.А. Минералогические и петро-геохимические исследования горного сырья Полярного Урала для производства петроситаллов / Д.А. Бычков, А.В. Мананков, Б.С. Страхов // Материалы I Всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». – Томск : Том. политехнический ун-т, 2012. – С. 42–43.
5. Бычков, Д.А. Мониторинг окружающей среды с многолетнемерзлыми породами для обоснования технических решений экологической безопасности / Д.А. Бычков, А.В. Мананков, Б.С. Страхов // Материалы I Всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». – Томск : Том. политехнический ун-т, 2012. – С. 75–76.
6. Бычков, Д.А. Разработка новых строительных конструкций и технологий на основе петроситаллов для инфраструктуры добычи и транспортировки нефти и газа / Д.А. Бычков, А.В. Мананков, Б.С. Страхов // Материалы I Всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». – Томск : Том. политехнический ун-т, 2012. – С. 91–92.
7. Бычков, Д.А. Техничко-экономическое обоснование применения новых строительных конструкций и технологий на основе петроситаллов / Д.А. Бычков, А.В. Мананков, Б.С. Страхов // Материалы I Всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». – Томск : Том. политехнический ун-т, 2012. – С. 138–139.

8. *Минералого-геохимические и экспериментальные исследования синтеза петроситаллов / А.В. Мананков, Д.А. Бычков, Б.С. Страхов, В.М. Яковлев, Н.Е. Быков // Сборник «Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии». – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 10–18.*
9. *Петрохимия и геохимия редкоземельных и рассеянных элементов в базитах Полярного Урала / А.В. Мананков, Д.А. Бычков, Н.Е. Быков, Б.С. Страхов // Сборник «Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии». – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 41–50.*
10. *Мананков, А.В. Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья / А.В. Мананков, Е.Я. Горюхин, А.А. Локтюшин. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 168 с.*

## REFERENCES

1. *Pavlushkin, N.M. Osnovy tekhnologii sitallov [Glass-ceramics technology]. Moscow : Stroyizdat, 1979. 360 p. (rus)*
2. *Manankov, A.V. Fiziko-khimicheskie osnovy nanostrukturnoi mineralogii v poluchenii sovremennykh materialov [Physicochemical principles of nano-structured mineralogy in advanced material production]. Vestnik TSUAB. 2012. No. 2. Pp. 120–136. (rus)*
3. *Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i mineral'no-syr'evoi potentsial Severnogo, Pri-polyarnogo i Polyarnogo Urala [The properties of geological structure of mineral raw materials in Northern, Nether-Polar and Polar Urals]. Ed. A.F. Morozov, et al. St.-Petersburg : VSEGEI Publ., 2010. 274 p. (rus)*
4. *Bychkov, D.A., Manankov, A.V., Strakhov, B.S. Mineralogicheskie i petro-geokhimicheskie issledovaniya gornogo syr'ya Polyarnogo Urala dlya proizvodstva petrositallov [Mineralogical and petro-geochemical research into rock raw materials of Polar Urals for rock glass-ceramics production]. Proc. 1<sup>st</sup> All-Rus. Youth Conf. 'Russia in the Arctic'. Tomsk : TPU Publishing House, 2012. Pp. 42–43. (rus)*
5. *Bychkov, D.A., Manankov, A.V., Strakhov, B.S. Monitoring okruzhayushchei sredy s mnogo-letnemerzlymi porodami dlya obosnovaniya tekhnicheskikh reshenii ekologicheskoi bezopasnosti [Permafrost environment monitoring for feasibility study of environmental protection]. Proc. 1<sup>st</sup> All-Rus. Youth Conf. 'Russia in the Arctic'. Tomsk : TPU Publishing House, 2012. Pp. 75–76. (rus)*
6. *Bychkov, D.A., Manankov, A.V., Strakhov, B.S. Razrabotka novykh stroitel'nykh konstruksii i tekhnologii na osnove petrositallov dlya infrastruktury dobychi i transportirovki nefiti i gaza [Development of new glass-ceramics constructions and technology for oil and gas production and transportation]. Proc. 1<sup>st</sup> All-Rus. Youth Conf. 'Russia in the Arctic'. Tomsk : TPU Publishing House, 2012. Pp. 91–92. (rus)*
7. *Bychkov, D.A., Manankov, A.V., Strakhov, B.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya novykh stroitel'nykh konstruksii i tekhnologii na osnove petrositallov [Feasibility study of new glass-ceramics constructions and technology]. Proc. 1<sup>st</sup> All-Rus. Youth Conf. 'Russia in the Arctic'. Tomsk : TPU Publishing House, 2012. Pp. 138–139. (rus)*
8. *Manankov, A.V., Bychkov, D.A., Strakhov, B.S., Yakovlev, V.M., Bykov, N.E. Mineralogo-geokhimicheskie i eksperimental'nye issledovaniya sinteza petrositallov [Mineralogical and geochemical research into rock glass-ceramics synthesis]. Sbornik «Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Azii». Tomsk : TSU Publishing House, 2012. Pp. 10–18. (rus)*
9. *Manankov, A.V., Bychkov, D.A., V.M., Bykov, Strakhov, B.S. Petrokhimiya i geokhimiya redkozemel'nykh i rasseyannykh elementov v bazitakh Polyarnogo Urala [Petrochemistry and geochemistry of rare-earth and trace elements in basic rocks of Polar Urals]. Sbornik «Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Azii». Tomsk : TSU Publishing House, 2012. Pp. 41–50. (rus)*
10. *Manankov, A.V., Goryukhin, E.Ya., Loktyushin, A.A. Vollastonitovye, piroksenovye i drugie materialy iz promyshlennykh otkhodov i nedefitsitnogo prirodnogo syr'ya [Wollastonite, pyroxene, and other materials based on industrial waste and abundant natural raw materials]. Tomsk : TSU Publishing House, 2002. 168 p. (rus)*

УДК 541.183

КИСЕЛЁВА МАИНА АЛЕКСАНДРОВНА, канд. хим. наук, доцент,  
*makisseleva@ngs.ru*

НАУМОВА ЛЮДМИЛА БОРИСОВНА, канд. хим. наук, доцент,  
*NaumovaLB@mail.ru*

СКВОРЦОВА ЛИДИЯ НИКОЛАЕВНА, канд. хим. наук, доцент,  
*dk@xf.tsu.ru*

ГАЕВАЯ ЛЮБОВЬ НИКОЛАЕВНА, студентка,  
Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФЕНОЛА И ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИРОДНЫМИ СОРБЕНТАМИ

Изучена сорбция фенола и щавелевой кислоты на природных сорбентах – низинном и верховом торфах Орловского месторождения Томской области и активированном угле древесного происхождения. Определены физико-химические характеристики сорбентов. Исследовано влияние кислотности среды, концентрации сорбируемых веществ, навески сорбента, времени контакта сорбента с раствором на избирательность сорбции. Проведена оценка возможности удаления фенола и щавелевой кислоты из водных растворов исследуемыми сорбентами.

**Ключевые слова:** сорбенты; фенол; щавелевая кислота; степень извлечения.

MAINA A. KISELEVA, PhD, A/Professor,  
*makisseleva@ngs.ru*

LYUDMILA B. NAUMOVA, PhD, A/Professor,  
*NaumovaLB@mail.ru*

LIDIYA N. SKVORTSOVA, PhD, A/Professor,  
*dk@xf.tsu.ru*

LYUBOV' N. GAEVAYA, Student,  
National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

## A POSSIBILITY OF EXTRACTING PHENOL AND OXALIC ACID FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY NATURAL SORBENTS

A possibility of using natural sorbents for removal of phenol and oxalic acid from aqueous solutions was studied in this paper. Orlovskoe peat bogs located in the Tomsk region and charcoal are used as natural sorbents. Physicochemical properties of sorbents were identified herein. The influence of pH of the medium, concentration of adsorbed substances, sorbent sample weights, interaction time between sorbent and solution on absorption selectivity was studied. A possibility of phenol and oxalic acid removal from aqueous solutions by natural sorbents was investigated.

**Keywords:** sorbent; phenol; oxalic acid; degree of extraction.

## Введение

При современных темпах развития сельскохозяйственного и промышленного производства всё более актуальной становится проблема очистки поверхностных и сточных вод [1]. Одним из высокотоксичных загрязнителей является фенол (ПДК = 0,001 мг/л), который используется в производстве разнообразных красителей, пестицидов, лекарственных препаратов и других веществ. К токсичным веществам относятся также карбоновые кислоты, одним из представителей которых является щавелевая кислота. Она содержится во многих чистящих и моющих средствах, что обуславливает её наличие в бытовых сточных водах.

В настоящее время существует много методов, позволяющих разрушать растворимые органические вещества до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . К ним относятся озонирование [2], воздействие УФО [3], использование каталитического окисления [4] и др. Для извлечения загрязнителей успешно используются сорбционные методы [5]. Эффективными и дешёвыми сорбентами являются активированный уголь и торф, которые в последнее время находят всё более широкое применение [6–8]. В работах [9–11] отмечена высокая сорбционная активность торфа по отношению к ионам металлов и нефтепродуктам. Показано [12], что модифицирование торфа растворами хлорида железа (III) и алюминия приводит к внутренним перестройкам в фазе сорбента, что способствует увеличению сорбции полярных и неполярных органических веществ. Железосодержащие композиционные материалы на основе торфа рекомендованы для очистки вод от растворённых органических загрязнителей [13].

В настоящей работе изучены физико-химические свойства сорбентов – активированного угля древесного происхождения и торфов Орловского месторождения Томской области: верхового со степенью разложения 5–10 % и низинного типа со степенью разложения 25–30 %. Исследована их сорбционная способность по отношению к фенолу и щавелевой кислоте.

## Экспериментальная часть

Исследование физико-химических свойств сорбентов проводили по известным методикам. Для оценки кислотно-основных свойств использовали метод потенциометрического титрования [14]. Из кривых титрования определяли полную обменную ёмкость (ПОЕ) и рК ионизации активных групп по уравнению Гендерсона – Хассельбаха. Исследование избирательности сорбции в зависимости от различных факторов осуществляли в статических условиях при постоянном перемешивании на встряхивателе. Для этого навеску сорбента массой 0,5 г помещали в коническую колбу и заливали 10 мл раствора фенола с концентрацией  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л или 10 мл раствора щавелевой кислоты с концентрацией  $2,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л. Кислотность среды в пределах значений рН от 1,0 до 10,5 создавали с помощью растворов  $\text{HCl}$  ( $\text{NaOH}$ ), контролируя по рН-метру; навеску сорбента варьировали в интервале (0,1–3,0) г. По истечении определённого времени сорбент отфильтровывали. В фильтрате определяли остаточное содержание фенола спектрофотометрическим методом с 4-аминоантипирином [15]; щавелевой кислоты – методом перманганатометрии. Для оценки избирательности сорбции рассчитывали коэффициент распределения  $D$  и процент сорбции  $R$  [14].

При изучении зависимости степени поглощения от времени контакта сорбентов с растворами исследуемых веществ строили кинетические кривые в координатах: степень достижения равновесия  $F$  – время контакта  $t$ . Степень достижения равновесия рассчитывали по формуле

$$F = Q_t / Q_\infty,$$

где  $Q_t$  – количество поглощённого вещества к моменту времени  $t$ ;  $Q_\infty$  – количество поглощённого вещества в момент равновесия. Для выяснения механизма сорбции применяли метод ИК-спектроскопии (фурье-спектрометр Nikolet).

### Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты исследования кислотно-основных свойств сорбентов, которые свидетельствуют о том, что исследуемые сорбенты являются амфолитами со слабокислотными и слабоосновными свойствами.

Таблица 1

**Физико-химические характеристики сорбентов (ПФГ – поверхностные функциональные группы)**

Сорбент		ПОЕ(H <sup>+</sup> ), ммоль/г	pK <sub>a</sub>	ПОЕ(OH <sup>-</sup> ), ммоль/г	pK <sub>b</sub>
Верховой торф		3,7	8,8	2,2	11,8
Низинный торф		6,3	9,2	1,2	11,1
Активированный уголь, ПФГ:	-COOH	0,3	7,8	–	–
	-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	0,9	8,9	–	–
	-OH	–	–	1,2	7,9

Количество кислотных групп в торфе значительно больше основных, поэтому жидкая фаза торфа в естественных условиях кислая. Данные по определению обменной кислотности, полученные нами, подтверждают это (рис. 1).

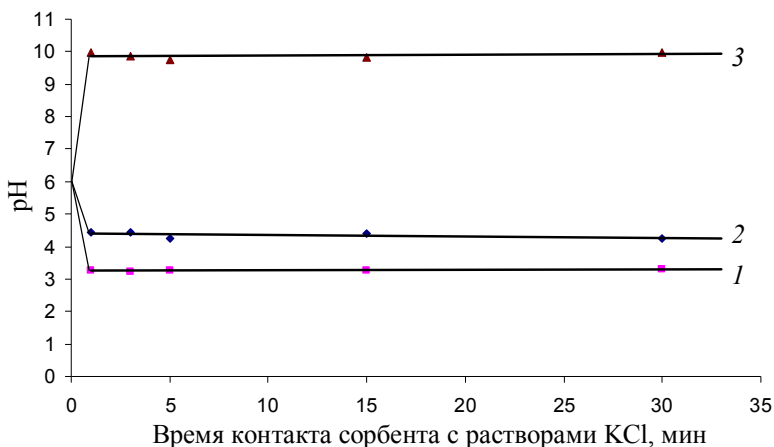


Рис. 1. Обменная кислотность сорбентов:

1 – верховой торф; 2 – низинный торф; 3 – активированный уголь (pH(KCl) = 6,0, C(KCl) = 0,1 моль/л, V – объём раствора = 25 мл; m – масса сорбента = 0,5 г)

Более высокий показатель кислотности имеет верховой торф ( $\text{pH} = 3,3$ ) по сравнению с низинным ( $\text{pH} = 4,4$ ), по-видимому, благодаря более высокому содержанию свободных гуминовых кислот. На поверхности активированного угля преобладают основные центры ( $\text{pH} = 9,9$ ).

На рис. 2 представлены кинетические кривые сорбции фенола и щавелевой кислоты на торфе, которые свидетельствуют о том, что равновесие сорбции щавелевой кислоты на торфах наступает раньше по сравнению с равновесием сорбции фенола. Это можно объяснить, предполагая, что сорбция щавелевой кислоты протекает за счёт ионного обмена с функциональными группами торфа, а сорбция фенола – по донорно-акцепторному механизму.

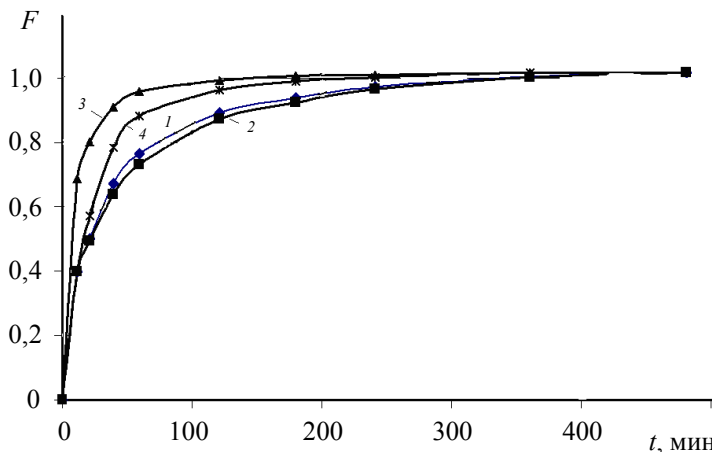


Рис. 2. Кинетические кривые фенола (1, 2) и щавелевой кислоты (3, 4) на низинном (1, 3) и верховом (2, 4) торфах:

$F$  – степень достижения равновесия;  $t$  – время (мин);  $m = 0,5$  г;  $V = 10$  мл;  $C$  (фенола) =  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  $C$  ( $1/2 \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) =  $2,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л

Фенол выступает в качестве донора, а функциональные группы гуминовых и фульвокислот (например, хинонная, кетонная) – в качестве акцепторов. Реакции ионного обмена протекают быстрее.

О донорно-акцепторном взаимодействии между фенолом и функциональными группами гуминовых и фульвокислот при сорбции фенола на торфе свидетельствуют результаты, полученные при изучении влияния  $\text{pH}$  раствора на избирательность сорбции (табл. 2).

Таблица 2

### Влияние $\text{pH}$ раствора на избирательность сорбции фенола

( $m_{\text{сорбента}} = 1,0$  г;  $V_{\text{р-ра}} = 30$  мл;  $C_{\text{фенола}} = 0,1$  мг/мл;  $t = 1$  ч)

Сорбент	Торф			
	низинный		верховой	
$\text{pH}$	$(D \pm \Delta D)$ , мл/г	$(R \pm \Delta R)$ , %	$(D \pm \Delta D)$ , мл/г	$(R \pm \Delta R)$ , %
2,3	$4,6 \pm 0,2$	$13,3 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,3$	$10,3 \pm 0,4$
4,2	$3,6 \pm 0,2$	$10,4 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,1$	$8,2 \pm 0,3$
10,5	$2,2 \pm 0,1$	$6,7 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,1$	$6,6 \pm 0,2$

Из данных табл. 2 видно, что с увеличением рН раствора сорбция фенола снижается. По-видимому, с ростом рН снижается реакционная способность акцепторов.

С целью повышения эффективности поглощения фенола на торфе навеску сорбента увеличили от 0,1 до 3 г. Такой приём позволил в несколько раз повысить степень извлечения фенола (табл. 3). Так как повышение рН снижает сорбцию фенола, следует проводить её из слабокислых растворов.

Таблица 3

**Влияние массы торфа на степень извлечения  $R$  (%) фенола из раствора**  
( $V_{\text{р-ра фенола}} = 10$  мл;  $C_{\text{фенола}} = 0,1$  мг/мл;  $t = 1$  ч)

Масса торфа, г	Торф	
	низинный	верховой
0,1	$6,6 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,2$
0,2	$8,0 \pm 0,2$	$9,6 \pm 0,2$
0,5	$14,9 \pm 0,4$	$12,5 \pm 0,3$
1,0	$23,4 \pm 0,6$	$20,1 \pm 0,5$
1,5	$34,4 \pm 0,9$	$26,7 \pm 0,7$
2,0	$37,3 \pm 1,2$	$27,4 \pm 0,8$
2,5	$45,2 \pm 1,1$	$28,9 \pm 0,7$
3,0	$46,1 \pm 1,2$	$34,0 \pm 0,9$

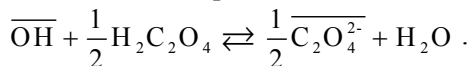
Кислотность среды оказывает влияние и на избирательность сорбции щавелевой кислоты (табл. 4). Особенно существенно это проявляется при сорбции на активированном угле: с увеличением рН снижается степень извлечения щавелевой кислоты.

Таблица 4

**Влияние рН раствора на избирательность сорбции щавелевой кислоты**  
( $m_{\text{сорбента}} = 1,0$  г;  $V_{\text{р-ра}} = 30$  мл;  $C_{\text{фенола}} = 0,1$  мг/мл;  $t = 1$  ч)

Сорбент	Торф				Активированный уголь	
	низинный		верховой			
рН	$(D \pm \Delta D)$ , мл/г	$(R \pm \Delta R)$ , %	$(D \pm \Delta D)$ , мл/г	$(R \pm \Delta R)$ , %	$(D \pm \Delta D)$ , мл/г	$(R \pm \Delta R)$ , %
1,0	$9,1 \pm 0,2$	$26,2 \pm 0,5$	$4,2 \pm 0,3$	$11,6 \pm 0,4$	$17,1 \pm 0,5$	$56,9 \pm 0,7$
1,4	$8,5 \pm 0,2$	$22,0 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,5$	$16,6 \pm 0,3$	$52,2 \pm 0,6$
2,3	$5,2 \pm 0,1$	$14,6 \pm 0,4$	$0,9 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,2$	$12,5 \pm 0,4$	$40,3 \pm 0,5$
6,5	$1,2 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,1$	–	–	$1,4 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$

Это может быть связано с тем, что поверхность этого сорбента покрыта оксидом основного характера, который в водном растворе образует гидроксильные группы, способные к обмену на анионы. При сорбции щавелевой кислоты в слабокислой среде, по-видимому, происходит её нейтрализация поверхностными гидроксидными группами с образованием карбоксилат-иона, что приводит к более высокой степени сорбции:



В среде, близкой к нейтральной (рН = 6,5), конкурентная реакция нейтрализации поверхности  $\text{OH}^-$ -групп практически отсутствует вследствие меньшей степени протонирования щавелевой кислоты, поэтому её сорбция существенно понижается. Механизм сорбции щавелевой кислоты на активированном угле по вышеприведённой реакции подтверждается методом ИК-спектроскопии. Образование карбоксилат-иона, т. е. переход приводит к появлению полос поглощения 1619 и 1318  $\text{cm}^{-1}$ , обусловленных асимметричными и симметричными колебаниями ионизованной карбоксильной группы (рис. 3).

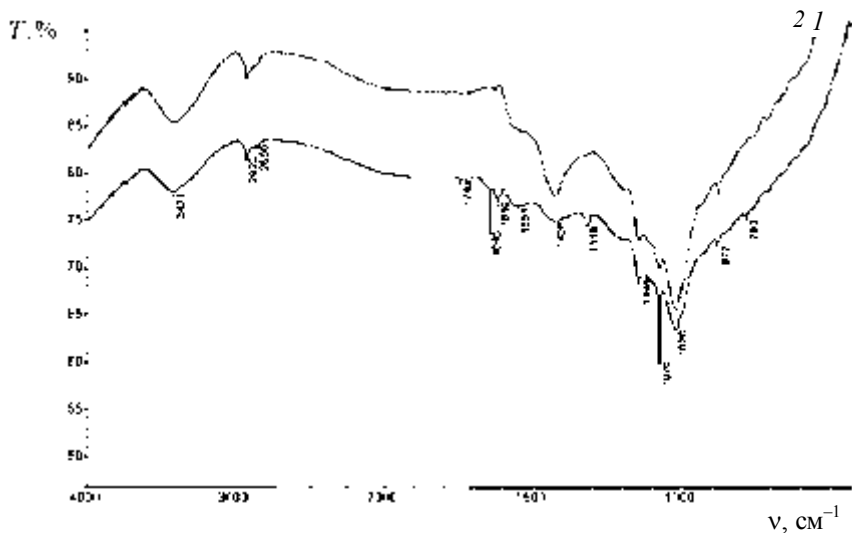
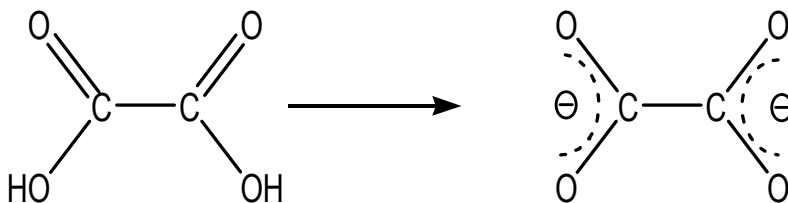


Рис. 3. ИК-спектры:

1 – исходного активированного угля; 2 – активированного угля после сорбции щавелевой кислоты

Из данных, приведённых в табл. 2 и 4, видно, что низинный торф обладает лучшей сорбционной способностью по сравнению с верховым. Вероятно, это связано с тем, что низинный торф, имея более высокую степень разложения, содержит на своей поверхности большее число функциональных групп, участвующих в сорбции изучаемых веществ.

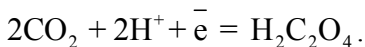
Изучение влияния концентрации щавелевой кислоты на степень её извлечения природными сорбентами показало (табл. 5), что наиболее перспективным является активированный уголь.

Таблица 5

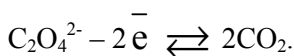
**Зависимость степени извлечения щавелевой кислоты ( $R, \%$ ) от ее концентрации в растворе**  
( $m_{\text{сорбента}} = 0,5 \text{ г}$ ;  $V(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 10 \text{ мл}$ ;  $t = 4 \text{ сут}$ )

Концентрация щавелевой кислоты, моль/л	Сорбент		
	Торф		Активированный уголь
	низинный	верховой	
0,0050	$29,7 \pm 0,8$	$13,8 \pm 0,4$	$76 \pm 3$
0,0125	$31,4 \pm 0,4$	$15,6 \pm 0,3$	$81 \pm 2$
0,0250	$38,2 \pm 0,5$	$18,0 \pm 0,3$	$82 \pm 3$

Значения величины степени извлечения  $R$  для  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  при контакте с активированным углем значительно больше по сравнению с торфом. Это может быть обусловлено тем, что уменьшение концентрации щавелевой кислоты после контакта с активированным углем может происходить не только в связи с сорбцией её на поверхности сорбента, но и вследствие окислительно-восстановительного процесса. Значение стационарного потенциала ( $E_{\text{ст}}$ ) поверхности активированного угля, установленное при исследовании условий выделения и концентрирования золота при анализе геохимических объектов методом АЭС [16], равно  $0,38 \text{ В}$  при  $\text{pH} = 1$ , что значительно превышает значение  $E^0 = -0,49 \text{ В}$  реакции



Таким образом, возможно окисление ионов  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ , образующихся при нейтрализации щавелевой кислоты у поверхности активированного угля по схеме:



При контакте щавелевой кислоты с активированным углем в течение 4 сут в статических условиях происходит практически полное удаление её из водного раствора.

### Выводы

1. Исследованы физико-химические свойства природных сорбентов – торфа и активированного угля древесного происхождения. Определена обменная кислотность, рассчитаны их ПОЕ и показатели кислотности.

2. Предложен механизм поглощения фенола и щавелевой кислоты на торфе. Показано, что сорбция фенола осуществляется за счёт донорно-акцепторного механизма, а щавелевой кислоты – за счёт ионного обмена с функциональными группами торфа.

3. Изучена избирательность активированного угля по отношению к фенолу и щавелевой кислоте в зависимости от концентрации, рН раствора, времени контакта с сорбентом. Высказано предположение, что значительное уменьшение концентрации раствора щавелевой кислоты при контакте с активированным углем связано не только с сорбцией кислоты на поверхности сорбента, но и с протеканием окислительно-восстановительных реакций.

4. Подобраны условия максимального поглощения щавелевой кислоты и фенола природными сорбентами.

5. Показана перспективность использования торфа и активированного угля для очистки растворимых органических веществ (щавелевой кислоты, фенола) из сточных вод различного происхождения.

### Заключение

Представленные результаты исследований показывают, что торф и активированный уголь являются перспективными сорбентами для извлечения загрязнителей из водных растворов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чибисова, Н.В. Экологическая химия / Н.В. Чибисова, Е.К. Долгань. – Калининград, 1999. – 113 с.
2. Dukkanci, M. Ultrasonic degradation of oxalic acid in aqueous solutions / M. Dukkanci, G. Gunduz // Ultrason. Sonochem. – 2006. – V. 13. – № 6. – P. 517–522.
3. Oppenlander, T. Photochemical Purification of Water and Air / T. Oppenlander. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag. – 2003. – 368 p.
4. J.Beltran, Fernando. TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst to improve the ozonation of oxalic acid in water / Fernando J. Beltran, Francisco J. Rivas A. // Applied Catalysis B: Environmental. – 2004. – V. 47. – P. 101–109.
5. Смирнов, А.Д. Сорбционная очистка воды / А.Д. Смирнов. – Л.: Химия, 1982. – 168 с.
6. Белькевич, П.И. Торф и проблема защиты окружающей среды / П.И. Белькевич, Л.Р. Чистова. – Минск: Наука и техника, 1979. – 60 с.
7. Корчагин, В.И. Очистка высококонцентрированных сточных вод с использованием отработанного активированного угля / В.И. Корчагин, Е.В. Складнев // ЖПХ. – 2005. – Т. 78. – № 9. – С. 1479–1481.
8. Инишева, Л.И. Концепция рационального использования торфяных ресурсов России / Л.И. Инишева, С.Г. Маслов // Химия растительного сырья. – 2003. – № 3. – С. 5–10.
9. Наумова, Л.Б. Торф как природный сорбент для выделения и утилизации металлов из сточных вод / Л.Б. Наумова, Н.П. Горленко, З.И. Отмахова // ЖПХ. – 1995. – Т. 68. – № 9. – С. 1461–1465.
10. Использование торфов Томской области при очистке сточных вод от ионов тяжёлых металлов и нефтепродуктов / Л.Б. Наумова, Н.П. Горленко, З.И. Отмахова, Г.М. Мокроусов // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – № 5. – С. 609–611.
11. Наумова, Л.Б. Сорбция ионов меди и кадмия природными сорбентами / Л.Б. Наумова, О.В. Чашина, Н.П. Горленко // ЖФХ. – 1994. – Т. 66. – № 4. – С. 688–691.
12. Математические модели сорбции ионов меди и кобальта верховым торфом / А.В. Жуйкова, Е.Б. Чернов, Н.П. Горленко, Л.Б. Наумова // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3. – С. 236–242.

13. Наумова, Л.Б. Исследование влияния модифицирующих добавок хлоридов железа и алюминия на водопоглонительную способность и термическую устойчивость торфа / Л.Б. Наумова, Л.А. Егорова, А.А. Сливинская // ЖПХ. – 2006. – Т. 79. – № 2. – С. 688–691.
14. Исследование сорбционной и каталитической активности композиционного материала на основе торфа по отношению к органическим загрязнителям в водах / Л.Б. Наумова, В.Н. Баталова, Г.М. Мокроусов, Е.А. Диденко, А.А. Солодкая // ЖПХ. – 2010. – Т. 83. – Вып. 3. – С. 396–399.
15. Мархол, М. Ионообменники в аналитической химии / М. Мархол. – М. : Мир, 1985. – 620 с.
16. Новиков, Ю.В. Методы исследования качества воды водоёмов / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина. – М. : Медицина, 1990. – 400 с.
17. Skvortsova, L.N. Isjlation and concentration of Au(III) and Pt(II) ions on the activated coal from HCl – containing solutions / L.N. Skvortsova, I.O. Begeza, Yu.N. Kondratova // International conference «Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology». V. 2. September 11–16, 2006. Tomsk, Russia. – P. 118–120.

## REFERENCES

1. Chibisova, N.V., Dolgan', E.K. Ekologicheskaya khimiya [Ecological chemistry]. Kaliningrad. 1999. 113 p. (rus)
2. Dukkanci M., Gunduz G. Ultrasonic degradation of oxalic acid in aqueous solutions. *J. Ultrason. Sonochem.* 2006. V.13. No. 6. Pp. 517–522.
3. Oppenlander, T. Photochemical Purification of Water and Air. Weinheim: WILEY-VCH Verlag. 2003. 368 p.
4. Beltran, F.J., Rivas, F.J., Espinosa, R.M.D. A TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst to improve the ozonation of oxalic acid in water. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2004. V. 47. Pp. 101–109.
5. Smirnov, A.D. Sorbtionnaya ochistka vody [Sorptions water purification]. Leningrad : Khimiya, 1982, 168 p. (rus)
6. Bel'kevich, P.I., Chistova, L.R. Torf i problema zashchity okruzhayushchei sredy [Peat and environmental protection]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1979. 60 p. (rus)
7. Korchagin, V.I., Sklyadnev, E.V. Ochistka vysokokontsentrirrovannykh stochnykh vod s ispol'zovaniem otrabotannogo aktivirovannogo uglya [Purification of highly concentrated sewage using spent activated carbon]. *J. Applied Chem.* 2005. V. 78. No. 9. Pp. 1479–1481. (rus)
8. Inisheva, L.I., Maslov, S.G. Kontseptsiya ratsional'nogo ispol'zovaniya torfyanykh resursov Rossii [The concept of peat bog management in Russia]. *Bioorganicheskaya Khimiya.* 2003. No. 3. Pp. 5–10. (rus)
9. Naumova, L.B., Gorlenko, N.P., Otmakhova, Z.I. Torf kak prirodnyi sorbent dlya vydeleniya i utilizatsii metallov iz stochnykh vod [Peat as natural sorbent for separation and recovery of metals from waste waters]. *J. Applied Chem.* 1995. V. 68. No. 9. Pp. 1461–1465. (rus)
10. Naumova, L.B., Gorlenko, N.P., Otmakhova, Z.I., Mokrousov, G.M. Ispol'zovanie torfov Tomskoi oblasti pri ochistke stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov i nefteproduktov [Peat of the Tomsk region used in sewage deionization and mineral oil removal]. *Chemistry for Sustainable Development.* 1997. No. 5. Pp. 609–611. (rus)
11. Naumova L.B., Chashchina O.V., Gorlenko, N.P. Sorbttsiya ionov medi i kadmiya prirodnyimi sorbentami [Sorptions of copper and cadmium ions by natural sorbents]. *J. Applied Chem.* 1994. V. 66. No. 4. Pp. 688–691. (rus)
12. Zhuikova, A.V., Chernov, E.B., Gorlenko, N.P., Naumova, L.B. Matematicheskie modeli sorbttsii ionov medi i kobal'ta verkhovym torfom [Mathematical models for sorptions of cuprous and cobalt ions by highbog peat]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2013. No. 3. Pp. 236–242. (rus)
13. Naumova, L.B., Egorova, L.A., Slivinskaya, A.A. Issledovanie vliyaniya modifitsiruyushchikh dobavok khloridov zheleza i alyuminiya na vodopoglotitel'nyuyu sposobnost' i termicheskuyu ustoichivost' torfa [Research into ferrous and aluminum chloride modified additives affected water treatment and thermal stability of peat]. *J. Applied Chem.* 2006. V.79. No. 2. Pp. 688–691. (rus)

14. *Naumova, L.B., Batalova, V.N., Mokrousov, G.M., Didenko, E.A., Solodkaya, A.A.* Issledovanie sorbtionnoi i kataliticheskoi aktivnosti kompozitsionnogo materiala na osnove torfa po otnosheniyu k organicheskim zagryaznitelyam v vodakh [Investigation of sorption and catalytic activity of peat-based composite material in organic pollutants in waters]. *J. Applied Chem.* 2010. V.83. No. 3. Pp. 396–399. (rus)
15. *Marhol, M.* Ionoobmenniki v analiticheskoi khimii [Ion exchangers in analytical chemistry]. Moscow: Mir, 1985. 620 p. (rus)
16. *Novikov, Yu.V., Lastochkina, K.O., Boldina, Z.N.* Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov [Research methods of water quality of ponds]. Moscow: Meditsina, 1990. 400 p. (rus)
17. *Skvortsova, L.N., Begeza, I.O., Kondratova, Yu.N.* Isulation and concentration of Au(III) and Pt(II) ions on the activated coal from HCl-containing solutions. *Proc. Inter. Conf. 'Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology'*. Tomsk: V. 2. 2006. Pp. 118–120.

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628

*СКОЛУБОВИЧ ЮРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
rector@sibstrin.ru*

*БОЙКО ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА, ст. преподаватель,  
boa@ngs.ru*

*ЗЕРКАЛЬ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
zerkal@ngs.ru*

*СКОЛУБОВИЧ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ, канд. техн. наук,  
skolubovicha@mail.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)*

*630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113*

*РОГАЗИНСКИЙ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, докт. физ.-мат. наук,  
ст. научный сотрудник*

*svr@osmf.ssc.ru*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики  
СО РАН,*

*630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

## **ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ФИЛЬТРУЮЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ**

Выполнен анализ математической модели, отображающей работу взвешенной фильтрующей загрузки реактора-осветлителя. В рассмотрение вошло новое предположение траектории движения частицы примеси в фильтрующем слое. Установлена сильная зависимость статистической модели от выбора модели (свободное перемещение и с диаграммой перемещения) движения частицы примеси в фильтрующем слое для различного характерного радиуса зерен загрузки.

**Ключевые слова:** численные результаты; моделирование; фильтрование; взвешенный слой.

*YURI L. SKOLUBOVICH, DSc, Professor,  
rector@sibstrin.ru*

*OL'GA A. BOIKO, Senior Lecturer,*

*boa@ngs.ru*

*SERGEI M. ZERKAL', DSc, Professor,*

*zerkal@ngs.ru*

*ALEKSEI Yu. SKOLUBOVICH, PhD,*

*skolubovicha@mail.ru*

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,*

*113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia*

*SERGEI V. ROGAZINSKII, DSc, Senior Research Assistant,*

*svr@osmf.sccc.ru*

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,*

*6, Lavrent'ev Ave., 630090, Novosibirsk, Russia*

## **NUMERICAL SIMULATION OF BEHAVIOR OF FILTERING BED ENTRAPPING SUSPENDED IMPURITIES**

The paper presents a mathematical model of suspended filtering material behavior in a clarifying reactor. A new assumption concerning the movement of impurity particles in a filtering bed is discussed in this paper. A strong dependence was established between a statistical model and a choice of the movement trajectory model (free movement and displacement diagram) of particles in a filtering bed for various grain radii of filtering material.

**Keywords:** numerical results; simulation; filtering; suspended impurities.

### **Введение**

В настоящей работе численно определяются оптимальные параметры математической модели взвешенного фильтрующего слоя контактной массы, а именно характерного размера частиц примеси и поправочного коэффициента вероятности прилипания частицы примеси к зернам фильтрующего слоя для различных размеров зерен загрузки. Таким образом, возможно определение необходимого количества ввода коагулянта и флокулянта для оптимального процесса фильтрования реактора-осветлителя (как по продолжительности производственного цикла, так и по качеству очистки исходной жидкости) для заданных физических параметров фильтрующего слоя (тип загрузки, высота слоя, взвешенность слоя).

Системный подход к исследованию общей постановки исходной проблемы включает в себя сравнение усложняющихся «вложенных» задач по размерности рабочей пространственной области, граничным условиям, рабочим внутренним параметрам фильтра.

Таким образом, в данном случае при рассмотрении модели фильтра взвешенного слоя контактной массы с учетом ограничения его размеров [1] необходимо выполнить численные исследования, аналогичные ситуации без ограничений [3].

На рис. 1 представлены оптимальные результаты моделирования для среднего радиуса зерен загрузки  $r_3 = 0,3$  мм. При масштабируемом коэффициенте вероятности прилипания, равном 0,5 (квадратики), средний радиус частиц примеси равен  $r_{np} = 9,5 \cdot 10^{-3}$  мм, коэффициент плотности прилипания составля-

ет 140. При масштабируемом коэффициенте вероятности прилипания, равном 1,0 (треугольники), средний радиус частиц примеси равен  $r_{\text{пр}} = 6,8 \cdot 10^{-3}$  мм, коэффициент плотности прилипания также составляет 140.

Результаты моделирования удовлетворительно соответствуют физическому эксперименту. При этом, исходя из показателей работы фильтра на начальном этапе (первые 5 ч работы) и на конечном этапе (последние 6 ч работы), можно говорить, что рассмотренная модель хорошо согласуется с экспериментом. На промежуточном этапе работы наблюдается незначительное расхождение результатов моделирования с экспериментом, при этом наблюдается зависимость изменения численных результатов от выбора значения масштабируемого коэффициента вероятности прилипания.

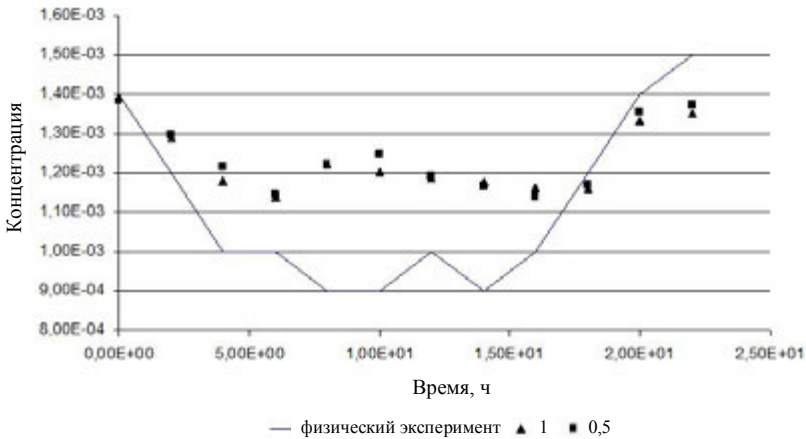


Рис. 1. Результаты моделирования при  $r_3 = 0,3$  мм для разных поправочных коэффициентов вероятности прилипания

На рис. 2 представлен оптимальный результат моделирования для среднего радиуса зерен загрузки  $r_3 = 0,4$  мм для масштабируемого коэффициента вероятности прилипания, равного 0,5.

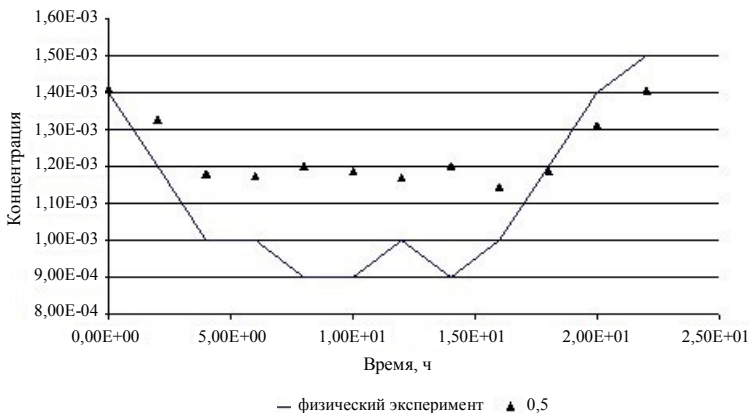


Рис. 2. Результаты моделирования при  $r_3 = 0,4$  мм для поправочного коэффициента вероятности прилипания 0,5

В данном случае оптимальный размер примеси равен  $r_{\text{пр}} = 1,45 \cdot 10^{-2}$  мм, коэффициент плотности прилипания составляет 140.

Наблюдаются схожие результаты, что и при моделировании для радиуса зерен загрузки  $r_3 = 0,3$  мм, но при этом наблюдается незначительное изменение численных результатов, а именно «прижатие» вычислительной кривой к экспериментальной кривой.

На рис. 3 представлен оптимальный результат моделирования для среднего радиуса зерен загрузки  $r_3 = 0,5$  мм для масштабируемого коэффициента вероятности прилипания, равного 0,5. В данном случае оптимальный размер примеси равен  $r_{\text{пр}} = 2,05 \cdot 10^{-2}$  мм, коэффициент плотности прилипания составляет 140.

Наблюдаются схожие результаты, что и при моделировании для предыдущих радиусов зерен загрузки, но в данном случае на начальном этапе работы фильтра можно увидеть более быстрое отклонение от результатов эксперимента, а на промежуточном этапе численные результаты менее отклонены от результатов физического эксперимента.

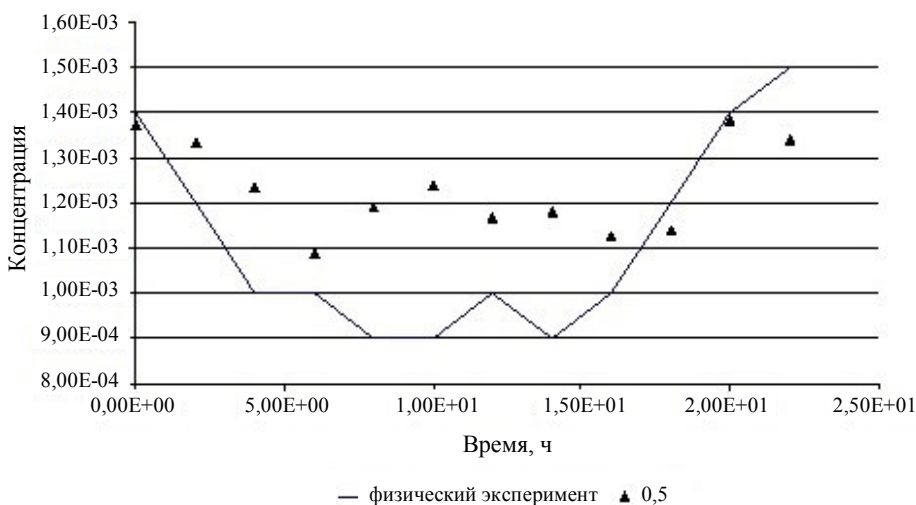


Рис. 3. Результаты моделирования при  $r_3 = 0,5$  мм для поправочного коэффициента вероятности прилипания 0,5

На рис. 4 представлены оптимальные результаты моделирования для среднего радиуса зерен загрузки  $r_3 = 0,6$  мм. При масштабируемом коэффициенте вероятности прилипания, равном 0,5 (треугольники), средний радиус частиц примеси равен  $r_{\text{пр}} = 2,7 \cdot 10^{-2}$  мм, коэффициент плотности прилипания составляет 140. При масштабируемом коэффициенте вероятности прилипания, равном 0,2 (квадратики), средний радиус частиц примеси равен  $r_{\text{пр}} = 4,1 \cdot 10^{-2}$  мм, коэффициент плотности прилипания также составляет 140.

В данном случае наблюдается существенное отличие результатов моделирования в зависимости от выбора масштабируемого коэффициента вероятности прилипания.

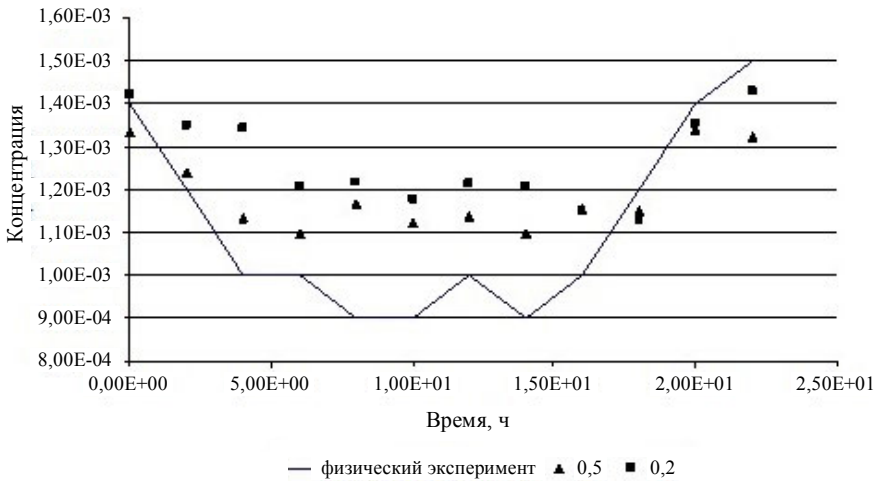


Рис. 4. Результаты моделирования при  $r_3 = 0,6$  мм для разных поправочных коэффициентов вероятности прилипания

На рис. 5 отображены суммарные оптимальные результаты моделирования для различного радиуса зерен загрузки.

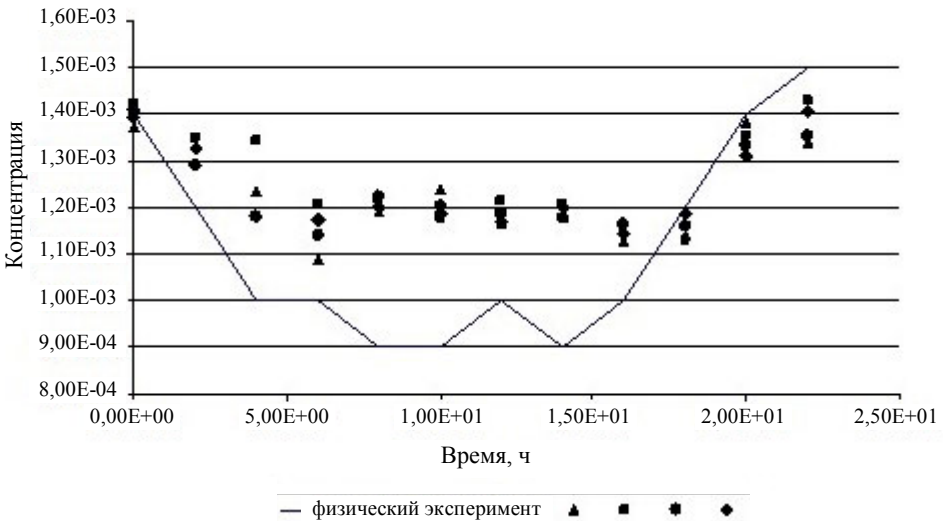


Рис. 5. Результаты моделирования для различных радиусов загрузки с оптимально подобранными параметрами

Как видно из рис. 5, при выборе определенных значений (радиус зерен загрузки, масштабируемый коэффициент вероятности прилипания, радиус

частицы примеси и коэффициент плотности прилипания) можно оптимизировать математическую модель.

### Заключение

При анализе результатов численного моделирования установлено, что данная математическая модель [1, 2] сильно зависит от выбора модели (свободное перемещение и с диаграммой перемещения) движения частицы примеси в фильтрующем слое.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Математическая модель* фильтра взвешенного слоя контактной массы с учетом ограничения его размеров по горизонтали / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль, С.В. Рогазинский, Н.В. Синеева // Вестник МГСУ. – 2013. – № 10. – С. 28–34.
2. *Численное моделирование* процесса очистки водных растворов в псевдооживленном слое контактной массы / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль, С.В. Рогазинский, Е.Л. Войтов, А.Ю. Сколубович // Изв. вузов. Строительство. – 2012. – № 7–8. – С. 38–44.
3. *Численное исследование* влияния ошибок измерения физических параметров реакторосветлителя на устойчивость его статистической модели / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль, С.В. Рогазинский, Е.Л. Войтов, А.Ю. Сколубович // Изв. вузов. Строительство. – 2012. – № 9. – С. 60–65.

### REFERENCES

1. *Skolubovich, Yu.L., Boiko, O.A., Zerkal', S.M., Rogazinskii, S.V., Sineeva, N.V.* Matematicheskaya model' fil'tra vzveshennogo sloya kontaktnoi massy s uchetom ogranicheniya ego razmerov po gorizontali [A mathematical model of filtering contact mass suspended impurities with a horizontal reduction of its sizes]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2013. No. 10. Pp. 28–34. (rus)
2. *Skolubovich, Yu.L., Boiko, O.A., Zerkal', S.M., Rogazinskii, S.V., Voitov, E.L., Skolubovich, A.Yu.* Chislennoe modelirovanie protsessa oчитki vodnykh rastvorov v psevdoozhivennom sloe kontaktnoi massy [Numerical simulation of aqueous solution purification in a fluid bed of contact mass]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2012. No. 7–8. Pp. 38–44. (rus)
3. *Skolubovich, Yu.L., Boiko, O.A., Zerkal', S.M., Rogazinskii, S.V., Voitov, E.L., Skolubovich, A.Yu.* Chislennoe issledovanie vliyaniya oshibok izmereniya fizicheskikh parametrov reaktora-osvetlителя na ustoychivost' ego statisticheskoi modeli [Numerical study of errors in measuring physical parameters of reactor clarifier affected the statistical model stability]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2012. No. 9. Pp. 60–65. (rus)

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 625.7/.8 (571.1)

*ЕФИМЕНКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
svefimenko\_80@mail.ru*

*ЕФИМЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
svefimenko\_80@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*АФИНОГЕНОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ, канд. техн. наук,  
afinogenov@smtp.ru*

*ООО «Кузбасский центр дорожных исследований»,  
650010, г. Кемерово, ул. Якимова, 82*

## **К УТОЧНЕНИЮ СХЕМЫ ДОРОЖНО-КЛИМАТИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Приведены результаты исследований по учету распределения геокомплексов в природных условиях Западной Сибири. На примере Кемеровской области отмечены отличия в территориальном распространении дорожно-климатических зон, схематично выделенных в действующих нормах проектирования автомобильных дорог. Показаны рекомендации по дорожно-климатическому районированию территории юго-востока Западной Сибири с учетом особенностей водно-теплового режима грунтов земляного полотна.

**Ключевые слова:** метод; дорожно-климатическое районирование; геокомплексы; однородность; эффективность.

*SERGEI V. EFIMENKO, PhD, A/Professor,  
svefimenko\_80@mail.ru*

*VLADIMIR N. EFIMENKO, Dsc, Professor,  
svefimenko\_80@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

ALEKSEI O. AFINOGENOV, PhD, A/Professor,  
afinogenov@smtp.ru  
ООО «Kuzbasskii Tsentр Dorozhnykh Issledovaniy»,  
82, Yakimov Str., 650010, Kemerovo, Russia

## THE OUTLINE OF ROAD BUILDING CLIMATIC ZONING IN WESTERN SIBERIA

The paper presents research findings on geographic complex distribution under natural conditions of Western Siberia. On the example of the Kemerovo region, the paper shows differences in territorial boundaries of road building climatic zones which are schematically presented in design standards for automobile roads. Recommendations are given for road building climatic zoning in the south-east of Western Siberia accounting for water and thermal conditions of subgrade soils.

**Keywords:** method; road building climatic zoning; geocomplexes; uniformity; efficiency.

С 1 июля 2013 г. в дорожной отрасли введен в действие Свод правил СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги» [1] (актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85\*). Среди нововведений этого документа – карта дорожно-климатического районирования (прил. Б, обязательное), простирающие границы зон на которой отличается от ранее принятого и нашедшего отражение в ряде действующих нормативных документов на проектирование дорог общего пользования. В соответствии с новыми данными часть территории, например, Кемеровской области отнесена к I дорожно-климатической зоне (подзона I<sub>3</sub>): восточнее линии Алтайск – Чугунаш – Междуреченск – г. Крестовая – Урюп (рис. 1). Напомним, нормативным документом [2] вся территория Кемеровской области была отнесена к III дорожно-климатической зоне.

Закономерности, выявленные при исследовании влияния геокомплексов на протекание водно-тепловых процессов в грунтах земляного полотна автомобильных дорог Западно-Сибирского региона, позволили установить [3], что, например, более 60 % территории Кемеровской области по зональным, интразональным и региональным признакам соответствует географической зоне лесов с избыточным увлажнением, т. е. II дорожно-климатической зоне, а не III, как это отражено в правилах [2]. При этом I дорожно-климатическая зона включает в себя территории тундры, лесотундры и северо-восточную часть лесной зоны с распространением многолетнемерзлых грунтов. На территории Кузбасса отсутствуют геокомплексы, обладающие подобными признаками. Выделенная в документе [1] территория Кемеровской области, как часть подзоны I<sub>3</sub>, относится к горным районам, где высота влияет на климат местности и обуславливает проявление вертикальной зональности в характеристиках почвенного покрова.

Одним из общепризнанных критериев выделения однородных территорий при дорожно-климатическом районировании является увлажненность той или иной местности, которую можно выразить через гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК). Естественно предположить, что при выделе-

нии территорий, однородных по обозначенному критерию, фактическая увлажненность грунтов в насыпях строящихся автомобильных дорог должна иметь тесную связь со значениями гидротермического коэффициента (ГТК), характерными для тех или иных районов.

В качестве показателя (коэффициента) увлажненности принято отношение фактической влажности грунта в насыпи дороги к его оптимальной влажности, определяемой по ГОСТ 22733–2002. В работе [4] получены экспериментальные значения коэффициента увлажненности  $K_{\text{увл}}$  для различных климатических районов Кемеровской области. Используя их и средние значения гидротермического коэффициента по соответствующим климатическим районам, ранее рассчитанные в работе [5], выполнена оценка взаимосвязи параметров. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2.



Рис. 1. Дорожно-климатическое районирование территории Кемеровской области: пунктирные линии – по СП 34.13330.2012: I, II, III – дорожно-климатические зоны; 1–2 – подзоны сплошные – по В.Н. Ефименко; I, II, III – дорожно-климатические зоны; Р, Х, Г – подзоны по типу рельефа (равнинный, холмистый, гористый); 1–4 – номера дорожных районов

Таблица 1

**Сопоставление значений гидротермического коэффициента (ГТК), коэффициента увлажнения грунта и коэффициента уплотнения грунта**

Показатель	Дорожно-климатический район по предложению ТГАСУ			
	П.Х.1	П.Г.2	Ш.Р.3	Ш.Х.4
Гидротермический коэффициент Селянинова	1,9	1,5	1,3	1,1
Коэффициент увлажнения грунта	1,22	1,07	1,04	0,95
Коэффициент уплотнения грунта	0,941	0,962	0,973	0,986

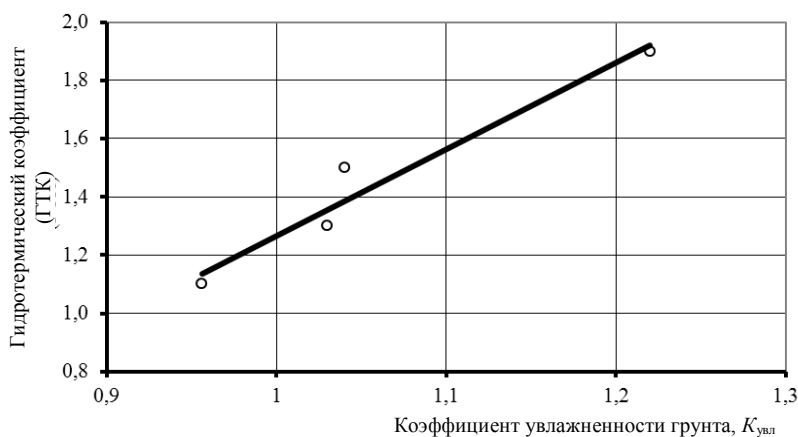


Рис. 2. Связь гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) и коэффициента увлажнения глинистых грунтов ( $K_{увл}$ )

Из рис. 2 видно, что зависимость  $ГТК = f(K_{увл})$  достаточно тесная и практически прямая. Аналитически она может быть выражена зависимостью (при  $R^2 = 0,982$ )

$$ГТК = 3,02K_{увл} - 1,78.$$

Относительная влажность (коэффициент увлажнения) глинистых грунтов, используемых в насыпях автомобильных дорог, – один из наиболее важных технологических параметров, учитываемых при сооружении земляного полотна. Столь тесная связь его и гидротермического коэффициента однозначно подтверждает целесообразность и достоверность дифференцированного дорожно-климатического районирования территорий Российской Федерации. Кроме того, такое районирование может служить не только для целей планирования дорог, но и быть полезным для проектирования мероприятий по их строительству.

В табл. 2 приведены среднестатистические значения основных строительных характеристик глинистых грунтов по отдельным дорожно-климатическим районам территории Кемеровской области, выделенным по результатам исследований специалистов ТГАСУ. Данные табл. 2 показывают, что строительные свойства грунтов по отдельным районам существенно раз-

личаются (кроме районов Ш.Р.3 и Ш.Х.4), и подтверждают необходимость использования в практической деятельности именно дифференцированного дорожно-климатического районирования в системе «зона – подзона – район».

Несмотря на незначительное различие показателей по районам Ш.Р.3 и Ш.Х.4, значения коэффициентов увлажненности для них существенно разнятся, что сказывается и на достигаемых коэффициентах уплотнения грунта (см. табл. 1). Таким образом, из представленных данных не следует возможность объединения указанных климатических районов в подзону или зону. Причем установлена тесная связь между коэффициентом увлажненности грунта и достигаемой степенью его уплотнения при возведении насыпей в отдельных климатических районах. Эту зависимость иллюстрирует рис. 3.

Таблица 2

**Среднестатистические значения  
основных строительных характеристик глинистых грунтов  
по отдельным дорожно-климатическим районам Кемеровской области**

Показатель грунта	Дорожно-климатический район по предложению ТГАСУ			
	Ш.Х.1	Ш.Г.2	Ш.Р.3	Ш.Х.4
Максимальная плотность, кг/см <sup>3</sup>	1,84	1,66	1,71	1,72
Оптимальная влажность, %	15,45	21,74	19,15	19,98
Фактическая (естественная) влажность в насыпи, %	18,80	23,28	19,88	19,10

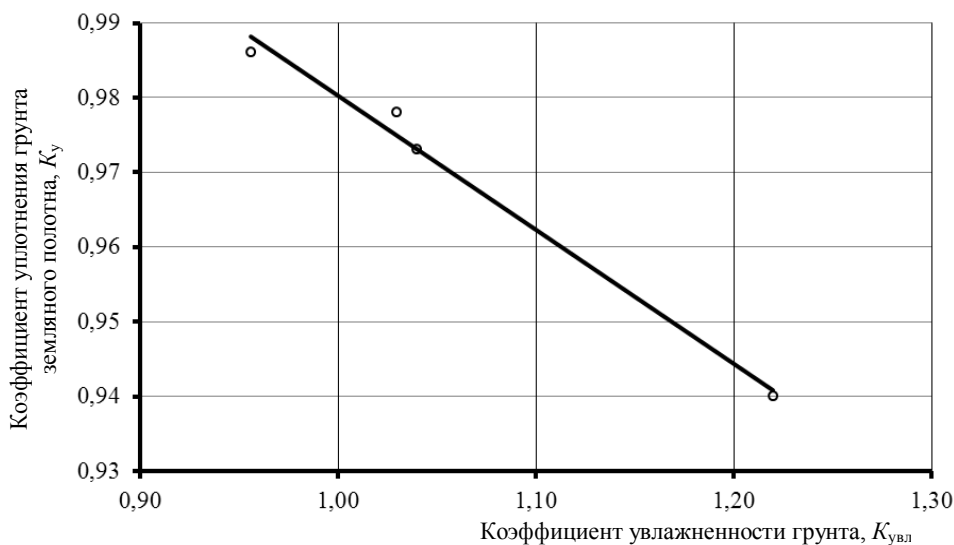


Рис. 3. Взаимозависимость коэффициентов уплотнения и увлажненности грунта

Коэффициент уплотнения грунта земляного полотна является основным параметром, характеризующим надежность и прочность дорожной конструк-

ции, его можно считать одним из интегральных показателей качества автомобильной дороги. Существенное различие достигаемых значений  $K_{\text{упл}}$  по отдельным климатическим районам и их тесная зависимость от коэффициента увлажненности (соответственно и от гидротермического коэффициента Селянинова) также являются аргументом в пользу дифференцированного дорожно-климатического районирования.

Из схемы, приведенной на рис. 1, видно, что районирование Кемеровской области по СП 34.13330.2012 и предлагаемое ТГАСУ существенно различается. Сводом правил нормировано следующее деление: территория севернее линии Томск – Мариинск – Боготол относится к подзоне  $\Pi_2$ ; восточнее линии Алтайск – Чугунаш – Междуреченск – г. Крестовая – Урюп – подзона  $\text{I}_3$ ; остальная территория – подзона  $\text{III}_1$ .

Отметим, что в примечании к карте дорожно-климатического районирования (приложение Б) указано: «При соответствующем обосновании общее дорожно-климатическое районирование территории России может уточняться в рамках отдельных субъектов Российской Федерации». Однако предложенное сводом правил допущение свидетельствует о недостаточном совершенстве схемы дорожно-климатического районирования.

К сожалению, недостаточная разработанность критериев однородности и целостности выделяемых районов, отсутствие правил выбора элементов наблюдения, назначения географических границ, а также разнородность приёмов сбора и обработки исходных данных тормозят эффективное использование решений по дорожно-климатическому районированию отдельных регионов России, предложенных в последние годы [6, 7, 8]. Подобные исследования в регионах России сегодня носят локальный характер и касаются лишь отдельных административных образований, что обусловлено сложностью исполнительской организации работ, значительными трудовыми и финансовыми затратами при их проведении. При отсутствии единой идеологии работ результаты, представленные исполнителями, трудно поддаются стыковке, даже в случаях соприкосновений территорий исследований.

По нашему мнению, при крайне значительных территориальных распространениях дорожно-климатических зон на территории России уточнение дислокации их границ, выделение таксонометрических единиц более низкого порядка в системе «зона – подзона – дорожный район» целесообразно осуществлять в пределах административных границ областей и краёв. Такой подход в дорожно-климатическом районировании позволит разработчикам карт и схем, характеризующих простирающиеся зоны на территориях регионов, избежать ошибок, подобных приведённому примеру из свода правил по юго-востоку Западной Сибири, будет способствовать выделению однородных по геокомплексам дорожных районов, обеспечивая требуемое качество проектирования и строительства автомобильных дорог.

Отечественный и зарубежный опыт разработки принципов дорожного районирования [9, 10, 11] подтверждает, что рациональный учёт территориальных природно-климатических условий может базироваться на применении таксонометрической системы: «зона – подзона – район». В этой системе таксон «дорожный район» соответствует однородной территории, характеризуе-

мой типичными, свойственными только ей климатом, геологией, рельефом местности и другими факторами [12]. Внутри этой территории однотипные дорожные конструкции, прежде всего земляное полотно и дорожные одежды, в сходных грунтово-гидрологических условиях должны характеризоваться примерно одинаковой прочностью и устойчивостью. Понятие «подзона» включает в себя однородную территорию физико-географической фации, приуроченной, например, к элементам морфографии. Таксон «зона» объединяет соподчиненные блоки «район» и «подзона» в систему, характеризующую земную поверхность с однородным распределением тепла и влаги, способствующих развитию определённых и взаимосвязанных типов почв и растительности. В соответствии с изложенным принципом специалистами ТГАСУ выполнены работы по районированию территорий административных образований, расположенных в Западной Сибири [13], в том числе Кемеровской области (см. рис. 1).

Предлагаемая авторами методика уточнения территориальной дислокации границ дорожно-климатических зон включает в себя несколько этапов исследований [7, 14].

На первом этапе дорожно-климатического районирования формируют информационную базу для моделирования показателями геокомплексов зонального и интразонального характера. К зональным признакам относят климатические условия (средние, максимальные и минимальные температуры воздуха, количество и сезонное распределение осадков, испарение с поверхности суши, высоту снежного покрова, глубину и скорость промерзания земляного полотна автомобильных дорог, влагообеспеченность территории). Интразональные природные факторы могут существенно изменяться в пределах территории каждой зоны. Среди подобных факторов можно считать: рельеф местности (равнинный, холмистый, гористый); гранулометрический состав грунтов и др. Показатели, учитываемые при районировании, назначают на основе полевых, лабораторных исследований, изучения особенностей водно-теплового режима грунтов земляного полотна автомобильных дорог и по справочным источникам применительно к опорным пунктам (населённые пункты на территории исследования).

Отметим, что формирование банка исходных данных для моделирования элементами геокомплексов, выделения доминирующих факторов зависит от предназначения дорожно-климатического районирования – в целях проектирования, строительства или ремонта и содержания автомобильных дорог.

Второй этап исследований по дорожному районированию отдельных территорий можно реализовать либо за счёт покомпонентного наложения схем распространения элементов геокомплексов, либо с привлечением математических приёмов обработки характеристик, включённых в информационную базу, например, с применением разработанного специалистами ТГАСУ программного продукта [15]. Особенности алгоритма расчётов по этой программе приведены в работе [12].

Третий этап работы направлен на корректировку положения границ районов, подзон и зон для смежно расположенных территорий административных образований на значительных по площади территориях регионального

характера. При этом, как и для реализации второго этапа районирования, предложено математическое решение [12], позволяющее более полно отобразить естественную пространственную дифференциацию ландшафтной оболочки, обеспечить высокий уровень однородности выделяемых в системе «зона – подзона – район» территорий.

При этом научная новизна предлагаемого подхода заключается в выделении однородных территорий в региональных административных образованиях по комплексу природных и климатических условий с учётом закономерностей и связей, учитывающих особенность протекания водно-теплового режима грунтов земляного полотна на существующей сети автомобильных дорог.

Четвёртый этап уточнения простирающихся границ элементов таксонометрической системы направлен на назначение комплекса расчётных значений тех или иных параметров, применяемых при проектировании, строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог, по отношению к территориям, выделенным на предыдущих этапах работы.

Основываясь на результатах многолетних исследований влияния природно-климатических условий на состояние сети автомобильных дорог Западно-Сибирского региона, можем предположить, что предлагаемый нами методический подход к уточнению границ дорожно-климатических зон на обширной территории России может способствовать обеспечению требований к качеству проектирования и строительства транспортных сооружений и, соответственно, снижению эксплуатационных затрат в течение их жизненного цикла. Экономический эффект от уточнения дислокации границ и территориального распространения дорожно-климатических зон в Западно-Сибирском регионе при базисном уровне цен 2000 г., по нашим расчётам [16], может составлять более 100 тыс. руб. на 1 км автомобильной дороги.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги / Министерство регионального развития РФ. – М., 2013.
2. СНиП 2.05.02–85\*. Автомобильные дороги / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2004. – 56 с.
3. Ефименко, В.Н. Дорожно-климатическое районирование юго-восточной части Западной Сибири / В.Н. Ефименко, А.И. Шеслер // Автомобильные дороги. – 1980. – № 7. – С. 19–21.
4. Афиногенов, А.О. Обоснование региональных норм степени уплотнения глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог (На примере районов Западной Сибири) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск. – 2011. – 22 с.
5. Ефименко, В.Н. Дорожно-климатическое районирование территории Западной Сибири / В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, М.В. Бадина // Инновации, качество, образование – перспектива развития дорожного комплекса России: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 70-летию Алтайского края и КГУ «Алтайавтодор» (2–5 апреля 2007 г.). – Барнаул : Изд-во АЛТГТУ, 2007. – С. 121–129.
6. Ярмолинский, А.И. Комплексный подход к дорожному районированию территории Сахалинской области / А.И. Ярмолинский, А.П. Пичугов, И.Н. Пугачев. – Условия доступа : <http://ad.khstu.ru/files/statya/file/statja8.pdf>, свободный.
7. Ефименко, В.Н. Уточнение дислокации границ дорожно-климатических зон на территории Западной Сибири с применением методов математического моделирования /

- В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, М.В. Бадина // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 1. – С. 220–228.
8. *Гулько, О.Н.* Дорожно-климатическое районирование территории Крайнего Севера Европейской части России с наличием многолетнемерзлых грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 26 с.
  9. *Мотылев, Ю.Л.* Устойчивость земляного полотна в засушливых и пустынных районах / Ю.Л. Мотылев. – М. : Транспорт, 1969. – 230 с.
  10. *Автомобильные дороги* (Совершенствование методов проектирования и строительства) / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, М.И. Волков [и др.]. – Киев : Будивельник, 1973. – 278 с.
  11. *Zapata, C.E.* Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model for pavement design / *C.E. Zapata, W.N. Houston.* – Washington, D.C. : Transportation Research Board, 2008. – 62 p.
  12. *Ефименко, С.В.* Применение информационных систем при уточнении границ дорожно-климатических зон / С.В. Ефименко, Д.Н. Черепанов // Вестник МГСУ. – 2013. – № 6. – С. 214–222.
  13. *Афиногенов, О.П.* Конструирование и расчет дорожных одежд / О.П. Афиногенов, В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2008. – 371 с.
  14. *Ефименко, В.Н.* Методические основы дорожно-климатического районирования территории юго-востока Западной Сибири / В.Н. Ефименко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 10. – С. 87–90.
  15. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616874 Российская Федерация. Выявление простираения линий границ дорожных зон, подзон, районов / С.В. Ефименко, М.В. Бадина, Д.Н. Черепанов, С.П. Батуев. – № 2013614537 ; заявл. 03.06.13 ; опубл. 24.07.13
  16. *Ефименко, С.В.* Оценка экономической эффективности учета изменчивости геоконструкций при проектировании дорожных одежд автомобильных дорог / С.В. Ефименко, Т.В. Боброва // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 4 (32). – С. 136–140.

## REFERENCES

1. *SNiP 34.13330.2012* 'Avtomobil'nye dorogi' [Automobile roads]. Ministry of Regional Development of Russia. Moscow, 2013. (rus)
2. *SNiP 2.05.02–85\** 'Avtomobil'nye dorogi' [Automobile roads]. State Committee for Construction in the Soviet Union. Moscow, 2004. 56 p. (rus)
3. *Efimenko, V.N., Shesler, A.I.* Dorozhno-klimaticheskoe rajonirovanie jugo-vostochnoj chasti Zapadnoj Sibiri [Road building climatic zoning of the southeast Western Siberia]. *Avtomobil'nye Dorogi*, 1980. No. 7 Pp. 19–21. (rus)
4. *Afinogenov, A.O.* Obosnovanie regional'nykh norm stepeni uplotneniya glinistykh gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog (Na primere raionov Zapadnoj Sibiri) [Rationale for regional standards for subgrade clayey soil compaction of highways (in Western Siberia)]. Tomsk, 2011. 200 p. (rus)
5. Efimenko, V.N., Efimenko, S.V., Badina, M.V. Dorozhno-klimaticheskoe raionirovanie territorii Zapadnoj Sibiri [Road building climatic zoning in Western Siberia]. Proc. All-Rus. Sci. Conf. 'Innovations, Quality, Education: prospective development of road facilities in Russia'. Barnaul: ASTU Publ., 2007. V.1. Pp. 121–129. (rus)
6. *Yarmolinskii, A.I., Pichugov, A.P., Pugachev, I.N.* Kompleksnyi podkhod k dorozhnomu raionirovaniyu territorii Sakhalinskoi oblasti [Comprehensive approach to Road building climatic zoning in the Sakhalin region]. Access conditions : [http://ad.khstu.ru/files/statja/\\$file/statja8.pdf](http://ad.khstu.ru/files/statja/$file/statja8.pdf) (rus)
7. *Efimenko, V.N., Efimenko, S.V., Badina, M.V.* Utochnenie dislokatsii granits dorozhno-klimaticheskikh zon na territorii Zapadnoj Sibiri s primeneniem metodov matematicheskogo modelirovaniya [Specifying dislocation of road building climatic zone boundaries in West Siberia using mathematic modelling]. *Vestnik TSUAB*. 2007. No. 1. Pp. 220–228. (rus)

8. *Gul'ko, O.N.* Dorozhno-klimaticheskoe raionirovanie territorii Krainego Severa Evropeiskoi chasti Rossii s nalichiem mnogoletnemerzlykh gruntov [Road building climatic zoning in the Far North of European Russia]. *Coll. Papers MADI*. Moscow, 2004. Pp. 19–33. (rus)
9. *Motylev, Yu.L.* Ustoichivost' zemlyanogo polotna v zasushliviyykh i pustynnykh raionakh [Sub-grade stability in dry land and desert regions]. Moscow : Transport, 1969, 230 p. (rus)
10. *Sidenko, V.M., Batrakov, O.T., Volkov, M.I.* Avtomobil'nye dorogi (Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya i stroitel'stva) [Highways (Improvement of design techniques and construction)]. Kiev : Budivel'nik, 1973, 278 p. (rus)
11. *Zapata, C.E., Houston, W.N.* Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model for pavement design. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008. 62 p.
12. *Efimenko, S.V., Cherepanov, D.N.* Primenenie informatsionnykh sistem pri utochnenii granits dorozhno-klimaticheskikh zon [Information systems used for road building climatic zone boundaries]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2013, No. 6, Pp. 214–222. (rus)
13. *Afinogenov, O.P., Efimenko, V.N., Efimenko, S.V.* Konstruirovaniye i raschet dorozhnykh odezhd [Design and calculation of road pavements]. Kemerovo : Kuzbassvuzizdat, 2008. 371 p. (rus)
14. *Efimenko, V.N.* Metodicheskie osnovy dorozhno-klimaticheskogo raionirovaniya territorii Yugo-Vostoka Zapadnoi Sibiri [Methodological basics of road building climatic zone in the South-East of Western Siberia]. *News of Higher Education Institutions. Construction*. 2002, No. 10. Pp. 87–90. (rus)
15. *RF State Registration Certificate N 2013616874* IBM program. S.V. Efimenko, M.V. Badina, D.N. Cherepanov, S.P. Batuev. Vyyavlenie prostiraniya linii granits dorozhnykh zon, podzon, raionov [Identification of pro-deleting of lines of borders of road zones, subbands, areas]. N 2013614537; appl. 03.06.13; publ. 24.07.13. (rus)
16. *Efimenko, S.V., Bobrova, T.V.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti ucheta izmenchivosti geokompleksov pri proektirovanii dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh dorog [Economic effect from the assessment of geocomplex dynamic change in designing road pavements]. *SibADI Journal*. Omsk. 2013. No. 4 (32). Pp. 136–140. (rus)

УДК 625.7/8:330.13

*СИДОРЕНКО НИКОЛАЙ НИКАНОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
char62@mail.ru*

*БУРЛУЦКИЙ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, ст. преподаватель,  
abura124@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ СЕБЕСТОИМОСТИ ПЕРЕВОЗОК, СТОИМОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ, ЗАРАБОТНОЙ ПЛАТЫ РАБОТАЮЩЕГО НАСЕЛЕНИЯ**

Проведен анализ методики технико-экономического обоснования проектных решений при проектировании автомобильных дорог и транспортных сооружений, отмечены недостатки существующих методов, не позволяющих в полной мере учесть экономические затраты в процессе службы рассматриваемых вариантов. Для исключения отмеченных недостатков предложены зависимости, позволяющие учитывать изменение во времени себестоимости транспортных перевозок, стоимости ремонтных работ, заработной платы работающего населения, потерь от дорожно-транспортных происшествий. Это даст возможность обоснованно определять наиболее рациональные решения.

**Ключевые слова:** эффективность; строительная стоимость; дисконтированные и эксплуатационные затраты; интенсивность; скорость движения; себестоимость перевозок; срок окупаемости капиталовложений.

*NIKOLAI N. SIDORENKO, PhD, A/Professor,  
char62@mail.ru*

*ANDREI A. BURLUTSKII, Assistant Professor,  
abura124@yandex.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **ECONOMIC FEASIBILITY OF HIGHWAY AND TRANSPORT FACILITY DESIGN CONSIDERATIONS**

The paper presents the analysis of feasibility study of design considerations concerning highways and transport facilities. Shortcomings of the existing methods which, sometimes, do not take into account operating economic expenses are discussed herein. In order to exclude these shortcomings, dependences are offered allowing for a time change of own costs of transportation, repair, growth of salary, and road accidents that facilitates reasonable decisions.

**Keywords:** efficiency; cost of civil engineering work; discounted and operational costs; intensity; traffic; own cost of transportation; payback period.

Проектирование автомобильных, городских дорог и транспортных сооружений – это сложная инженерная задача, учитывающая воздействие большого многообразия факторов на обеспечение надежности и эффективности функционирования сооружения. Для получения наиболее рационального проектного решения прибегают к вариантному проектированию плана трассы, продольного профиля, транспортных сооружений, мостовых переходов, организации дорожного движения и др. Варианты сравнивают по технико-экономическим показателям [1, 2].

При сравнении вариантов проектных решений наибольшее применение получила экономико-математическая модель функционирования автомобильной дороги, транспортных сооружений во времени в виде дисконтированных затрат [1]

$$P_d = K_d + \sum_1^{tc} \frac{T_t}{(1 + E_d)^{tc}} + \sum_1^{tc} \frac{B_t}{(1 + E_d)^{tc}} + \sum_1^{tc} \frac{П_{ДТП}}{(1 + E_d)^{tc}}, \quad (1)$$

где  $K_d$  – дисконтированные затраты, тыс. руб.;  $\sum_1^{tc} \frac{T_t}{(1 + E_d)^{tc}}$  – сумма транспортных затрат, тыс. руб.;  $\sum_1^{tc} \frac{B_t}{(1 + E_d)^{tc}}$  – сумма потерь времени населения на поездки, тыс. руб.;  $\sum_1^{tc} \frac{П_{ДТП}}{(1 + E_d)^{tc}}$  – потери от ДТП, тыс. руб.;  $t_c$  – срок суммирования затрат, принимается 20 лет.

Дисконтированные затраты в тыс. руб. вычисляют по формуле [3]

$$K_d = K_c + \sum_1^n K_k \frac{1}{(1 + E_d)^{t_{кр}}} + K_t + \Delta K_t, \quad (2)$$

где  $K_d$  – строительные затраты на осуществление мероприятий;  $K_k \frac{1}{(1 + E_d)^{t_{кр}}}$  – стоимость капитального ремонта с учетом отдаленности его проведения, тыс. руб.;  $n$  – количество капитальных ремонтов;  $K_t$  – капиталовложения в автомобильный транспорт, тыс. руб.;  $\Delta K_t$  – дополнительные капиталовложения в автомобильный транспорт, тыс. руб.

Однако анализ данной экономико-математической модели показывает, что она имеет ряд недостатков, т. к. не учитывает изменений во времени стоимости капитальных ремонтов, связанных с удорожанием, переменных затрат себестоимости перевозок, увеличения заработной платы работающего населения страны. Вычисление экономических показателей без учета изменения затрат во времени не дает объективной картины эффективности принимаемых решений и приводит к неправильным результатам. Стоимость капитальных ремонтов с учетом изменения цен определится по формуле [1]

$$K_k = 0,01 \cdot K_c \cdot \beta(1 + 0,44 \cdot t_{k-1}), \quad (3)$$

где  $K_c$  – стоимость строительства объекта, тыс. руб.;  $\beta$  – доля затрат от стоимости строительства на выполнение капитального ремонта.

При вычислении транспортных затрат зависимость для определения стоимости транспортных затрат с учетом изменения переменных затрат и заработной платы работающего населения примет вид [1]

$$\sum_1^{ic} \frac{T_i}{(1 + E_d)^{ic}} = T_0 \sum_1^{ic} \frac{q_{ic}}{(1 + E_d)^{ic}}, \quad (4)$$

где  $T_0$  – годовые транспортно-эксплуатационные расходы на исходный год, тыс. руб.,

$$T_0 = 0,365 \cdot N_0 \cdot L \cdot S, \quad (5)$$

где  $S$  – себестоимость перевозок, руб./авт.-км.

Расчетная себестоимость пробега автомобилей на 1 км в конкретных дорожных условиях рекомендуется определять по формуле [1]

$$S = S_{\text{ПЕР}} (1 + 0,196 t_p - 0,004 t_p^2) K_g + \frac{S_{\text{ПОСТ}} + d f^{\text{п}}}{V_n}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{ПЕР}}$ ,  $S_{\text{ПОСТ}}$  – средние расчетные значения переменных и постоянных затрат автомобиля соответственно на 1 авт.-км и 1 авт./ч;  $d$  – средняя часовая заработная плата с начислениями водителя автомобиля;  $K_g$  – коэффициент влияния дорожных условий на размер переменных затрат; 0,35 – коэффициент ежегодного прироста заработной платы в России (установлен на основе анализа данных прогнозирования роста заработной платы до 2030 г. Министерством труда России);  $t_p$  – расчетный год, принимается равным 10–11 лет;  $V_n$  – средняя скорость потока, км/ч;  $f$  – коэффициент ежегодного прироста заработной платы в России (установлен на основе анализа данных прогнозирования роста заработной платы до 2030 г. Министерством экономического развития России соответственно при консервативном и инновационном вариантах развития) [3].

Выражение  $(1 + 0,196 t_p - 0,004 t_p^2)$  учитывает изменение переменных затрат себестоимости перевозок автомобилем во времени (устанавливается на основе данных по изменению стоимости ГСМ в отдельные годы).

Средние значения заработной платы водителей, переменных и постоянных затрат себестоимости перевозок устанавливают по формулам:

$$d = \frac{\sum d_i \cdot P_i}{\sum P_i}; \quad (7)$$

$$S_{\text{ПЕР}} = \frac{\sum S_{\text{ПЕР}i} \cdot P_i}{\sum P_i}; \quad (8)$$

$$S_{\text{ПОСТ}} = \frac{\sum S_{\text{ПОСТ}i} \cdot P_i}{\sum P_i}, \quad (9)$$

где  $d_i$  – часовая зарплата водителя  $i$ -го типа;  $S_{\text{ПОСТ}i}$ ,  $S_{\text{ПЕР}i}$  – значения переменных и постоянных затрат автомобиля  $i$ -го типа;  $P_i$  – доля автомобилей  $i$ -го типа в общем составе потока в ценах 2001 г.

Потери, связанные с затратами времени населения на поездки, определяют из выражения [1]

$$\sum_1^{\text{ic}} \frac{B_i}{(1+E_d)^i} = 0,365 \cdot C f^{tp} \left( N_0 \cdot P_L \frac{L}{\bar{V}_L} Q_L + N_0 \cdot P_A \frac{L}{\bar{V}_A} Q_A \right) \sum_1^{\text{ic}} \frac{q_i}{(1+E_d)^i}, \quad (10)$$

где  $C$  – среднегодовая величина потерь одного часа в расчете на 1 чел. пребывания в пути, включая потери от транспортной усталости,  $C = 26$  руб./ч в ценах 2001 г.;  $Q_L = 3$ ,  $Q_A = 30$  – среднее количество пассажиров в одном легковом автомобиле и в автобусе; соответственно  $P_L$ ,  $P_A$  – доля легковых автомобилей и автобусов в составе потока;  $\bar{V}_L$ ,  $\bar{V}_A$  – средняя скорость легковых автомобилей и автобусов, км/ч.

Среднюю скорость автобусов принимают равной скорости потока автомобилей. Среднюю скорость легковых автомобилей определяют из выражений в соответствии с типом покрытия

$$\bar{V}_L = \bar{V}_n + 20 \text{ – усовершенствованный капитальный;}$$

$$\bar{V}_L = \bar{V}_n + 15 \text{ – усовершенствованный облегченный;}$$

$$\bar{V}_L = \bar{V}_n + 10 \text{ – переходный и низший типы покрытия.}$$

Расчетная формула для определения потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий (ДТП) имеет вид [4]

$$\sum_1^{\text{ic}} \frac{\Pi_{\text{ДТП}}}{(1+E_d)^{\text{ic}}} = \Pi_{\text{ДТП}} \sum_1^{\text{ic}} \frac{q^{\text{ic}}}{(1+E_d)^{\text{ic}}}, \quad (11)$$

где  $\Pi_{\text{ДТП}}$  – потери от ДТП в исходном году, тыс. руб.

Потери от дорожно-транспортных происшествий в исходном году с учетом изменения заработной во времени определяют по формуле [4]

$$\Pi_{\text{ДТП}} = 3,65 \cdot 10^{-6} \sum_1^{\text{ic}} L_i \cdot \alpha_i \cdot C_{\text{ДТП}} \cdot f^{tp}, \quad (12)$$

где  $C_{\text{ДТП}}$  – размер потерь от одного ДТП в ценах 2001 г. составляет 180 тыс./руб. в равнинной местности, 220 тыс./руб. в пересеченной и 260 тыс. руб. в горной местности;  $L_i$  – протяженность участка дороги с однородными дорожными условиями, км;  $\alpha_i$  – количество ДТП на 100 млн авт.-км,

$$\alpha_i = 0,009K_i^2 + 0,27K_i + 34,5, \quad (13)$$

где  $K_i$  – итоговый коэффициент аварийности, может быть установлен путем построения линейного графика коэффициентов аварийности.

Учет тяжести ДТП производится итоговым поправочным коэффициентом  $m_T$  (поправка за счет тяжести происшествий вводится при  $K_i$  больше 15), равным произведению частных коэффициентов [4]

$$m_T = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_{11}, \quad (14)$$

где  $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_{11}$  – частные коэффициенты тяжести, учитывающие влияющие сочетания элементов плана, продольного профиля на изменение величины потерь от дорожно-транспортных происшествий.

Для оценки уровня эффективности вкладываемых средств по каждому варианту вычисляют следующие экономические показатели: чистый дисконтируемый доход (ЧДД); индекс доходности (ИД); срок окупаемости капиталовложений ( $T_{ок}$ ) [5].

$$\text{ЧДД} = P_{\text{дсущ}} - P_{\text{дпр}}, \quad (15)$$

где  $P_{\text{дсущ}}$  – сумма дисконтируемых затрат для существующего состояния или для варианта с наименьшими капиталовложениями, тыс. руб.;  $P_{\text{дпр}}$  – сумма дисконтируемых затрат для проектируемого варианта трассы, тыс. руб.

$$\text{ИД} = 1 + \frac{\text{ЧДД}}{K_{\text{дпр}}}. \quad (16)$$

Срок окупаемости инвестиций  $K_c$  определяют по зависимости

$$T_{ок}^c = \frac{(K_{\text{спр}} - K_{\text{дсущ}}) \sum_1^{ic} \frac{1}{(1 + E_d)^{ic}}}{\sum_1^{ic} Z_{\text{сущ}} - \sum_1^{ic} Z_{\text{пр}}}. \quad (17)$$

Ежегодная экономия от реализации мероприятий в ценах 2001 г. составляет

$$\Delta \Theta = \frac{K_d}{T_{ок}}, \quad (18)$$

где  $K_{\text{спр}}$  – величина инвестиций для проектируемого варианта трассы, тыс. руб.;  $K_{\text{дсущ}}$  – величина дисконтируемых капиталовложений для существующего состояния автомобильной дороги, тыс. руб.

Срок окупаемости дисконтируемых капиталовложений  $K_d$ :

$$T_{ок}^d = \frac{(K_{\text{дпр}} - K_{\text{дсущ}}) \sum_1^{ic} \frac{1}{(1 + E_d)^{ic}}}{\sum_1^{ic} Z_{\text{сущ}} - \sum_1^{ic} Z_{\text{пр}}}, \quad (19)$$

где  $K_{\text{дпр}}$  – величина дисконтируемых капиталовложений для проектируемого варианта, тыс. руб.;  $\sum_1^{ic} Z_{\text{сущ}}$ ,  $\sum_1^{ic} Z_{\text{пр}}$  – суммарные эксплуатационные затраты для существующего состояния и проектируемого варианта, тыс. руб.,

$$\sum_1^{ic} Z_{\text{пр}} = \sum_1^{ic} \frac{T_{t \text{ пр}}}{(1 + E_d)^{ic}} + \sum_1^{ic} \frac{B_{t \text{ пр}}}{(1 + E_d)^{ic}} + \sum_1^{ic} \frac{\text{П}_{\text{дтгПр}}}{(1 + E_d)^{ic}}; \quad (20)$$

$$\sum_1^{ic} Z_{\text{сущ}} = \sum_1^{ic} \frac{T_{t \text{ сущ}}}{(1 + E_d)^{ic}} + \sum_1^{ic} \frac{B_{t \text{ сущ}}}{(1 + E_d)^{ic}} + \sum_1^{ic} \frac{\text{П}_{\text{дтгСущ}}}{(1 + E_d)^{ic}}. \quad (21)$$

В таблице приведен пример технико-экономического сравнения вариантов реконструкции автомобильной дороги 3-й технической категории по методике [1, 5] и методике, учитывающей изменения во времени переменных составляющих себестоимости перевозок, стоимости капитальных ремонтов, увеличения заработной платы работающего населения.

**Сводная таблица технико-экономических показателей  
сравнения вариантов реконструкции автомобильной дороги  
по различным методикам**

№ п/п	Наименование показателей	Результаты расчета технико-экономического обоснования вариантов трассы автомобильной дороги			
		по методике [1, 5]		по предлагаемой методике	
		Вариант реконструкции дороги	Существующее состояние	Вариант реконструкции дороги	Существующее состояние
1	Интенсивность движения на исходный год $N_0$ , авт./сут	929	929	929	929
2	Средняя скорость движения, км/ч	43,65	25,2	43,65	25,2
3	Длина варианта, км	4,804	6,5	4,804	6,5
4	Затраты на строительство $K_c$ , остаточная стоимость, тыс. руб.	62 300	15 000	62 300	15 000
5	Затраты на капитальный ремонт $K_k$ , тыс. руб.	36 647	3186	37 240	19 018
6	Капиталовложения на автомобильный транспорт $K_t$ , тыс. руб.	5325	9721	4720	10 042
7	Дополнительные капиталовложения в автомобильный транспорт $\Delta K_t$ , тыс. руб.	2595	5034	2444	5200
8	Дисконтируемые капиталовложения $K_d$ , тыс. руб.	106 553	32 941	106 704	49 260
9	Сумма дисконтированных транспортных затрат $\Sigma T_t$ , тыс. руб.	3879	73 657	69 339	24 343
10	Сумма потерь населения на поездки $\Sigma B_t$ , тыс. руб.	32 016	69 326	50 874	110 160
11	Сумма потерь от ДТП $\Sigma P_{дтп}$ , тыс. руб.	1128	1527	1792	2425
12	Сумма транспортно-эксплуатационных расходов $\Sigma Z_t$ , тыс. руб.	71 223	144 509	122 005	236 928
13	Сумма дисконтируемых затрат $P_d$ , тыс. руб.	177 776	177 450	228 709	286 188
14	Чистый дисконтируемый доход ЧДД, тыс. руб.	–	326	57 479	–
15	Индекс доходности ИД	–	1,005	1,92	–
16	Срок окупаемости дисконтируемых капиталовложений $T_{ок}$ , лет	–	7,5	3,73	–

Анализ результатов расчетов, выполненных по методике [1, 5], показывает на неэффективность реконструкции автомобильной дороги при сопоставлении суммы дисконтированных затрат, индекса доходности с показателями существующего состояния дороги. Расчет, выполненный по предлагае-

мой методике, подтвердил высокую эффективность реконструкции дороги со сроком окупаемости дисконтированных капиталовложений за 3,73 года. Таким образом, установлено, что учет изменения во времени указанных показателей позволяет более достоверно и полно учитывать расходы и издержки населения при оценке экономической эффективности принимаемых решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог*: ВСН 21–83. – М. : Транспорт, 1985. – 125 с.
2. *Сидоренко, Н.Н.* Обоснование мероприятий по повышению эффективности функционирования транспортного комплекса «Пушкина – Комсомольский» – «Иркутский тракт – 1-я Рабочая» – «Пушкина – Яковлева» в г. Томске / Н.Н. Сидоренко, А.А. Бурлуцкий, Д.В. Выюгов // *Вестник ТГАСУ*. – 2013. – № 3. – С. 360–366.
3. *Сильянов, В.В.* Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке. – М. : ИЦ Академия, 2009. – 247 с.
4. *Инструкция по учету потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий при проектировании автомобильных дорог*: ВСН 3–81. – М. : Транспорт, 1981. – 57 с.
5. *Руководство по оценке экономической эффективности использования в дорожном хозяйстве инноваций и достижений научно-технического прогресса*. – М. : Минтранс РФ (Росавтодор), 2002. – 71 с.

#### REFERENCES

1. *BCN 21–83 'Ukazaniya po opredeleniyu ekonomicheskoi effektivnosti kapital'nykh vlozhenii v stroitel'stvo i rekonstruktsiyu avtomobil'nykh dorog'* [Guidelines for determination of economic efficiency of capital investments in construction and reconstruction of motor roads]. Moscow: Transport, 1985. 125 p. (rus)
2. *Sidorenko, N.N., Burlutskii, A.A., Vyugov, D.V.* Obosnovanie meropriyatiy po povysheniyu effektivnosti funktsionirovaniya transportnogo kompleksa «Pushkina – Komsomol'skii» – «Irkutskii trakt – 1-ya Rabochaya» – «Pushkina – Yakovleva» v g. Tomske [Rationale for raising the efficiency of traffic interchange «Pushkin str.–Komsomolskiy ave.» – «Irkutskiy Trakt–1<sup>st</sup> Rabochaya str.» – «Pushkin str.–Yakovlev str.» in Tomsk]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 360–366. (rus)
3. *Sil'yanov, V.V., Domke, E.R.* Transportno-ekspluatatsionnye kachestva avtomobil'nykh dorog i gorodskikh ulits [Transport and operational qualities of highways and city streets]. Moscow: ITs Akademiya [Publishing Center Academia], 2009. 247 p. (rus)
4. *BCN 3–81 'Instruktsiya po uchetu poter' narodnogo khozyaistva ot dorozhno-transportnykh proisshestvii pri proektirovaniy avtomobil'nykh dorog'* [Instructions on accounting national economy losses from road accidents]. Moscow: Transport, 1981. 57 p. (rus)
5. *Rukovodstvo po otsenke ekonomicheskoi effektivnosti ispol'zovaniya v dorozhnom khozyaistve innovatsii i dostizhenii nauchno tekhnicheskogo progressa* [Guide on economic feasibility of technological progress used in road facilities]. Moscow: Ministry of Transport of the Russian Federation (Rosavtodor), 2002. 71 p. (rus)

УДК 625.7: 519.6

*ШУМИЛОВ БОРИС МИХАЙЛОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,  
sbm@tsuab.ru*

*БАЙГУЛОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, главный инженер проектов,  
anbaigulov@mail.ru*

*АБДЫКАЛЫК КЫЗЫ ЖЫПАРГУЛ, ст. преподаватель,  
jypara@lenta.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ВЕЙВЛЕТ-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ\***

Рассмотрены вопросы разработки алгоритма и программы моделирования поверхностей автомобильных дорог с использованием бикубических эрмитовых сплайн-вейвлетов, ортогональных многочленам, по прямоугольным таблицам материалов лазерного сканирования. Представлены результаты численных экспериментов, описание разработанного пакета и результаты экспорта обработанных с помощью пакета данных в специализированную программу автоматизации проектирования автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** вейвлеты; обработка данных; автомобильные дороги; моделирование; алгоритм; программа.

*BORIS M. SHUMILOV, DSc, Professor,  
sbm@tsuab.ru*

*ANDREI N. BAIGULOV, Project Chief Engineer,  
anbaigulov@mail.ru*

*ZHYPARGUL ABDYKALYK, KYZY, Senior Lecturer,  
jypara@lenta.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **ALGORITHM AND WAVELET-MODELING PROGRAM FOR ROAD PAVEMENTS**

The paper describes the problems of algorithm and program design for modeling automobile road pavements using bicubic Hermitean spline-wavelets orthogonal to polynomials, and orthogonal lists of laser scanned materials. The paper presents results of numerical experiments and describes data burst used for data export in the appropriate CAD program intended for automobile roads.

**Keywords:** wavelets; data processing; roads; modeling; algorithm; program.

Трёхмерные цифровые модели местности (включая объекты транспортного, промышленного и гражданского строительства) находят широкое применение в самых разных областях человеческой деятельности. При создании

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту РФФИ 13-08-90900-мол\_ин\_нр.

таких моделей обычно используется твердотельное или поверхностное моделирование [1].

*Поверхностью* будем называть однозначную функцию высот от планового положения точек. *Сверхбольшой* поверхностью будем называть такую поверхность, исходные данные которой могут не уместиться в оперативной памяти компьютера либо не укладываться в топологию прямоугольного участка трассы (примыкания, уширения и др.). В настоящее время можно выделить следующие проблемы, связанные со сверхбольшими поверхностями.

Для построения цифровой модели поверхности, как правило, используют *триангуляцию* – планарный граф, все конечные грани которого являются треугольниками [2]. На сегодняшний день известно несколько видов триангуляций, но наибольшей популярностью пользуется триангуляция Делоне [2], которая обладает свойством хорошей аппроксимации исходной поверхности. Известные алгоритмы построения сверхбольших триангуляций Делоне приведены в работе [3]. Однако авторами этих алгоритмов не было предложено способа эффективного использования таких сверхбольших триангуляций. Поэтому полученные решения носят скорее теоретический характер и приводят к замедлению счета на практике.

В случае прямоугольной топологии алгоритм аппроксимации сводится к простой серии одномерных преобразований по строкам и столбцам таблицы высот – при этом основная трудность состоит в получении прямоугольной таблицы из «облака» данных. В качестве одномерных аппроксимаций могут использоваться сглаживающие сплайны, функции Безье, *B*-сплайны, сплайны Эрмита. В последнее время начали применяться алгоритмы обработки на основе вейвлетов [4], для которых пока не созданы все теоретические предпосылки.

**Базисные сплайн-вейвлеты 3-й степени.** Пусть имеется набор вложенных пространств  $\dots V_{L-1} \subset V_L \subset V_{L+1} \dots$ . Вейвлетами называется базисности пространств  $V_{L+1}$  и  $V_L$  [5]. В данном случае пространство  $V_L$  является пространством эрмитовых кубических сплайнов на отрезке  $[a, b]$  с равномерной сеткой узлов  $\Delta^L : x_i = a + (b-a)i/2^L, i = 0, 1, \dots, 2^L, L \geq 0$  и базисными функциями  $N_{i,k}^L(x) = \varphi_k(v-i), k = 0, 1 \forall i$ , где  $v = 2^L(x-a)/(b-a)$ , с центрами в целых числах, порожденными сжатиями и сдвигами двух базисных эрмитовых функций  $\varphi_0(t), \varphi_1(t), t \in [0, 2]$  [6, 7].

При условии [7] обнуления сплайна в конечных точках будем использовать в качестве вейвлетов линейные комбинации базисных эрмитовых функций на сетке  $\Delta^{L+1}$ , удовлетворяющие условиям ортогональности всем многочленам четвертого порядка, т. е.

$$\int_a^b M_{i,k}^L(x) x^m dx = 0, \quad k = 0, 1 \quad \forall i (m = 0, 1, 2, 3). \quad (1)$$

**Теорема [8].** Пусть

$$M_{i,k}^L(x) = \psi_k(v-i), \quad i = 1, 2, \dots, 2^L - 1 (k = 0, 1),$$

$$M_{0,1}^L(x) = w_1(v), \quad M_{2^L,1}^L(x) = -w_1(2^L - v),$$

где  $v = 2^L(x-a)/(b-a)$ ,

$$\begin{aligned}\psi_0(t) &= -2\varphi_0(2t+2) + 4\varphi_0(2t+1) - 2\varphi_0(2t) - 15\varphi_1(2t+2) + 15\varphi_1(2t), \\ \psi_1(t) &= 7\varphi_0(2t+2) - 7\varphi_0(2t) + 39\varphi_1(2t+2) + 132\varphi_1(2t+1) + 39\varphi_1(2t), \\ w_1(t) &= \varphi_0(2t+1) - 4\varphi_0(2t) + 36\varphi_1(2t+2) + 63\varphi_1(2t+1) + 24\varphi_1(2t).\end{aligned}\quad (2)$$

Тогда система функций

$\{M_{0,1}^L(x), M_{i,k}^L(x), i=1, 2, \dots, 2^L-1 (k=0, 1), M_{2^L,1}^L(x)\}$  удовлетворяет условиям (1) и образует вейвлет-базис для  $L \geq 1$ .

**Алгоритм вейвлет-преобразования.** На любой сетке  $\Delta^L, L \geq 1$  кубический эрмитов сплайн с нулевыми значениями при  $x=a, b$  может быть представлен как

$$S^L(x) = \sum_{i=1}^{2^L-1} C_i^{L,0} N_{i,0}^L(x) + \sum_{i=0}^{2^L} C_i^{L,1} N_{i,1}^L(x), \quad a \leq x \leq b, \quad (3)$$

где коэффициенты  $C_i^{L,k}, k=0, 1$  являются значениями и, соответственно, производными аппроксимируемой функции в узлах.

Если записать базисные сплайн-функции в виде единой матрицы-строки  $\varphi^L = [N_{0,1}^L, N_{1,0}^L, N_{1,1}^L, \dots, N_{2^L,1}^L]$  и упорядочить коэффициенты сплайна в виде вектора  $C^L = [C_0^{L,1}, C_1^{L,0}, C_1^{L,1}, \dots, C_{2^L}^{L,1}]$ , то уравнение (3) переписывается как  $S^L(x) = \varphi^L(x)C^L$ . Аналогично запишем базисные вейвлет-функции на уровне разрешения  $L$  в виде матрицы-строки  $\psi^L = [M_{0,1}^L, M_{1,0}^L, M_{1,1}^L, \dots, M_{2^L,1}^L]$ . Соответствующие вейвлет-коэффициенты будем собирать в вектор  $D^L = [D_0^{L,1}, D_1^{L,0}, D_1^{L,1}, \dots, D_{2^L}^{L,1}]$ . Тогда с использованием обозначений для блочных матриц процесс получения  $C^L$  из  $C^{L-1}$  и  $D^{L-1}$  [5, 8] может быть записан как

$$C^L = [P^L | Q^L] \begin{bmatrix} C^{L-1} \\ D^{L-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Блоки матрицы  $P^L$  составлены из коэффициентов масштабных соотношений для эрмитовых сплайнов 3-й степени [6], тогда как блоки матрицы  $Q^L$  – из коэффициентов соотношений (2). Обратный процесс разбиения коэффициентов  $C^L$  на более грубую версию  $C^{L-1}$  и уточняющие коэффициенты  $D^{L-1}$  состоит в решении системы линейных уравнений (4).

Результирующее вейвлет-разложение сплайна  $S^L(x)$  с нулевыми значениями по концам отрезка аппроксимации может быть записано в виде

$$S^L(x) = \sum_{i=0}^1 C_i^{0,1} N_{i,1}^0(x) + \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{2^j} D_i^{j,1} M_{i,1}^j(x), \quad a \leq x \leq b. \quad (5)$$

Ниже представлен пример матрицы  $[P^L | Q^L]$ , соответствующий  $L=3$ :



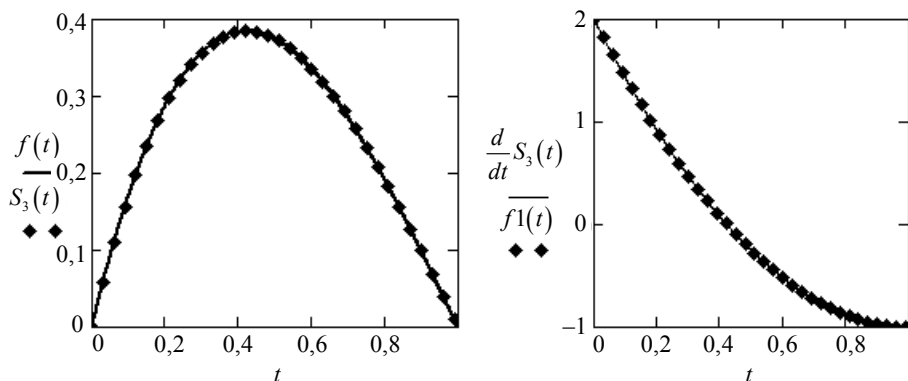
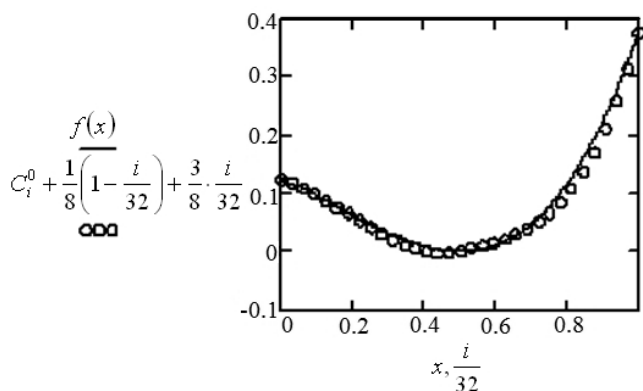


Рис. 1. Воспроизведение функции и производной

Рис. 2. Результаты вейвлет-реконструкции коэффициентов эрмитового сплайна 3-й степени для функции  $f(x) = (x^2 - 1/4)(x - 1/2)$ 

**Вычисление производных по выборке.** Использование при трассировании автомобильных дорог эрмитовых сплайнов позволяет в явном виде, через значения сплайн-коэффициентов, учесть геометрические ограничения как на пикеты автомобильной трассы, так и на направления касательных, например, при въезде на мостовое сооружение. В большинстве практических ситуаций даны только точечные значения функции. В этом случае при использовании вейвлет-преобразований, основанных на кубических эрмитовых сплайнах, мы должны будем вычислить приближенные значения производных в узлах самой густой сетки  $\Delta^L$  с подходящей точностью и затем применить наши алгоритмы. Отметим, что с точки зрения сжатия данных количество вейвлет-коэффициентов при этом по сравнению с методами, основанными на  $B$ -сплайн-вейвлет-преобразованиях [5], увеличится с  $n$  до  $2n$ . Однако в итоге с учетом аннулирования незначимых вейвлет-коэффициентов этот подход может все еще быть конкурентоспособным.

В случае равномерной сетки для вычисления первых производных точно-заданных функций предлагается решить линейную систему [9]

$$\tilde{f}'_{j-1} + 4\tilde{f}'_j + 4\tilde{f}'_{j+1} = \frac{3}{h} (f(x_{j+1}) - f(x_{j-1})), \quad (6)$$

которая обеспечивает приближение к точечным значениям для производных с ошибкой  $O(h^4)$  в предположении соответствующей гладкости.

В присутствии сингулярностей (нарушений монотонности в данных) линейность системы вносит большие ошибки, и не только на шаге, на котором функция не гладкая, но также и на нескольких соседних шагах, где функция гладкая. Это важно с точки зрения сжатия данных, потому что влечет дополнительные существенные вейвлет-коэффициенты в представлении (5). В исследовании [9] предлагалось для исправления полученных значений производных применять схему ENO. Мы предпочитаем использовать следующий результат из теории кубических эрмитовых сплайнов.

**Лемма о монотонности [10].** Если  $f[x_i, x_{i+1}] \geq 0$  и  $0 \leq \tilde{f}'_j \leq 3f[x_i, x_{i+1}]$ ,  $j = i, i+1$ , то  $(S^L)'(x) \geq 0$  для  $x \in [x_i, x_{i+1}]$ .

**Следствие (нелинейный алгоритм).** В окрестности точек, где  $f'(x) = 0$ , либо в местах, где производная функции изменяется быстро, а точки располагаются достаточно редко, вначале производные  $\tilde{f}'_j$  вычисляются с использованием (6), а затем значения, которые не удовлетворяют условиям леммы, корректируются согласно следующему алгоритму:

Для каждого  $i$ , такого, что  $|\tilde{f}'_j| > 3 \min(|f[x_{i-1}, x_i]|, |f[x_i, x_{i+1}]|)$ , заменяем  $\tilde{f}'_j$  на

$$\min(|f[x_{i-1}, x_i]|, |f[x_i, x_{i+1}]|) \operatorname{sign}(\tilde{f}'_j),$$

где применительно к этой формуле берем  $f[x_{-1}, x_0] = f[x_N, x_{N+1}] = \infty$ .

Тогда интерполяционный эрмитов сплайн  $S^L(x)$  будет монотонно возрастающим на участках возрастания значений  $f_i$  и монотонно убывающим на участках убывания значений  $f_i$ .

**Пример 3.** На рис. 3 приведен результат вейвлет-сжатия одного трека данных лазерного сканирования. Достигнуто сжатие с коэффициентом 15,9. Наибольшая возникающая погрешность не превышает 3,5 см. Общая длина трека более 4 км, показан профиль  $Y-Z$  участка длиной 450 м.

**Моделирование поверхностей.** Важной вспомогательной задачей при интерполяции незамкнутых поверхностей бикубическими сплайнами Эрмита с нулевыми краевыми условиями является построение поверхности Кунса [11]. Уравнение билинейной поверхности Кунса, значения которой на сторонах прямоугольной сетки совпадают со значениями аппроксимируемой поверхности, необходимо вычесть из исходных координат. Тогда исправленные значения координат по краям обнуляются, и к полученному после вейвлет-обработки бикубическому эрмитовому сплайну требуется добавить вычтенное ранее уравнение.

В частном случае, когда требуется вычислить функцию Кунса в узлах равномерной по параметрам  $u$  и  $v$  сетки, формула существенно упрощается:

$$K(i, j) = Z(0, j)(1-u) + Z(n, j)u + Z(i, m)v + Z(i, 0)(1-v) - \\ - Z(0, 0)(1-u)(1-v) - Z(0, m)(1-u)v - Z(n, 0)u(1-v) - Z(0, 0)u \cdot v,$$

где  $u = i/n$ ,  $v = j/m$ .

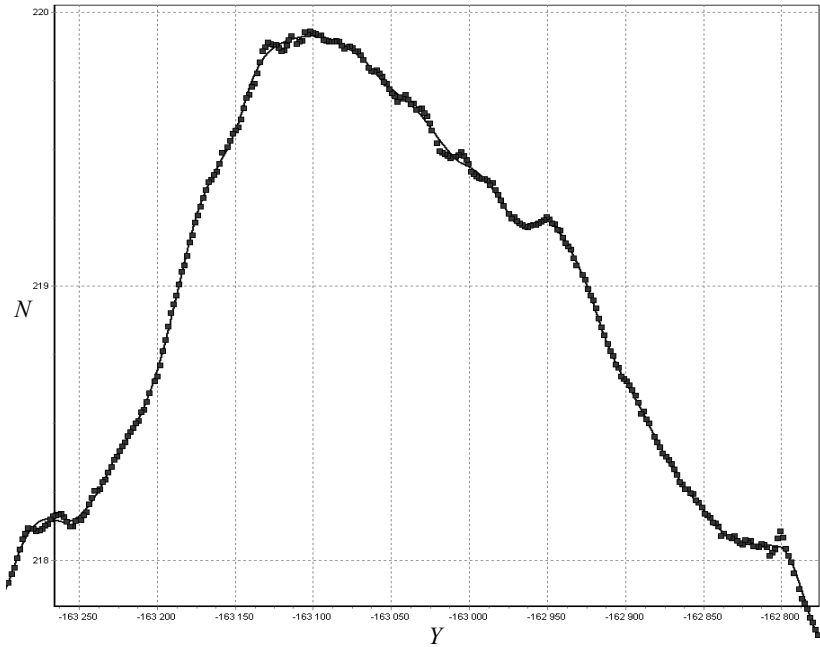


Рис. 3. Результат сжатия информации для одного трека

В результате на данном уровне  $L = L_1 \cdot L_2$  исправленную, как указано выше, поверхность следует аппроксимировать согласно формуле

$$\tilde{f}(u, v) \approx \sum_{i=0}^{2^{L_1}} \sum_{j=0}^{2^{L_2}} \sum_{k_1=0}^1 \sum_{k_2=0}^1 C_{i,j}^{k_1, k_2} N_i^{k_1}(u) N_j^{k_2}(v), \quad (7)$$

где  $N_i^k$  – базисные кубические сплайны Эрмита;  $C_{i,j}^{k_1, k_2}$  – значения функции, её градиентов по каждому направлению и смешанного градиента в точке  $i, j$ .

Обратим внимание на то, что значения функции в правой части формулы (7) равны нулю на всей границе прямоугольника  $[a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$ .

С учетом этого запишем базисные сплайн-функции в виде двух строк:  $\Phi_u^{L_1} = [N_0^1, N_1^0, N_1^1, N_2^0, N_2^1, \dots, N_{2^{L_1}-1}^1, N_{2^{L_1}}^1]$  и  $\Phi_v^{L_2} = [N_0^1, N_1^0, N_1^1, N_2^0, N_2^1, \dots, N_{2^{L_2}-1}^1, N_{2^{L_2}}^1]$  для направлений  $u$  и  $v$  соответственно. При введенных обозначениях формула для аппроксимации поверхности переписется как [4]

$$\tilde{f}(u, v) \approx \Phi_u^{L_1} \cdot C^L \left| \Phi_v^{L_2} \right|^T.$$

Здесь коэффициенты сплайна  $C_{i,j}^{k_2, k_2}$  образуют матрицу

$$C^L = \begin{pmatrix} C_{0,0}^{1,1} & C_{0,1}^{1,0} & C_{0,1}^{1,1} & \dots & C_{0,2^{L_2}}^{1,1} \\ C_{1,0}^{0,1} & C_{1,1}^{0,0} & C_{1,1}^{0,1} & \dots & C_{1,2^{L_2}}^{0,1} \\ C_{1,0}^{1,1} & C_{1,1}^{1,0} & C_{1,1}^{1,1} & \dots & C_{1,2^{L_2}}^{1,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{2^{L_1}-1,0}^{0,1} & C_{2^{L_1}-1,1}^{0,0} & C_{2^{L_1}-1,1}^{0,1} & \dots & C_{2^{L_1}-1,2^{L_2}}^{0,1} \\ C_{2^{L_1},0}^{1,1} & C_{2^{L_1},1}^{1,0} & C_{2^{L_1},1}^{1,1} & \dots & C_{2^{L_1},2^{L_2}}^{1,1} \end{pmatrix}.$$

Тогда для двумерного случая имеет место формула [4]

$$C^L = P^{L_1} \left[ C^{L_1-1, L_2-1} \cdot |P^{L_2}|^T + E^{L_1-1, L_2-1} \cdot |Q^{L_2}|^T \right] + Q^{L_1} \left[ F^{L_1-1, L_2-1} \cdot |P^{L_2}|^T + D^{L_1-1, L_2-1} \cdot |Q^{L_2}|^T \right],$$

где  $C^{L_1-1, L_2-1}, E^{L_1-1, L_2-1}, F^{L_1-1, L_2-1}, D^{L_1-1, L_2-1}$  – матрицы коэффициентов двумерного вейвлет-разложения. Последняя формула показывает, что двумерное вейвлет-разложение сводится к одномерному вейвлет-разложению для каждого столбца исходной матрицы данных  $C^L$  и получению при этом двух матриц промежуточных данных. Затем строки этих промежуточных матриц также подвергаются одномерному вейвлет-преобразованию – при этом получаем четыре итоговых матрицы и т. д.

**Функции пакета прикладных программ для моделирования трасс и поверхностей автомобильных дорог.** Изложенные выше алгоритмы были положены в основу пакета программ для обработки данных лазерного сканирования. Программы пакета позволяют решать следующие задачи [12]:

1. Импортировать данные лазерного сканирования, заданные в текстовых файлах.
2. Проводить разделение «облака» данных на сканы.
3. Убирать повторы сканов.
4. Выделять из «облака» данных поверхность дорожного полотна и производить прямоугольную выборку данных, пригодную для построения модели дорожной поверхности.
5. Представлять графическое изображение сканов, треков и поверхности дороги в выбранных профилях и планах с любой степенью детализации.
6. Давать визуальное трехмерное представление поверхности дороги с использованием технологии OpenGL.
7. Проводить вейвлет-анализ любого выбранного скана, любого трека дороги и всей поверхности с использованием как билинейных [4], так и бикубических эрмитовых вейвлетов с получением статистических оценок погрешности, возникающей при сжатии информации.

Внешний вид главного окна пакета представлен на рис. 4.

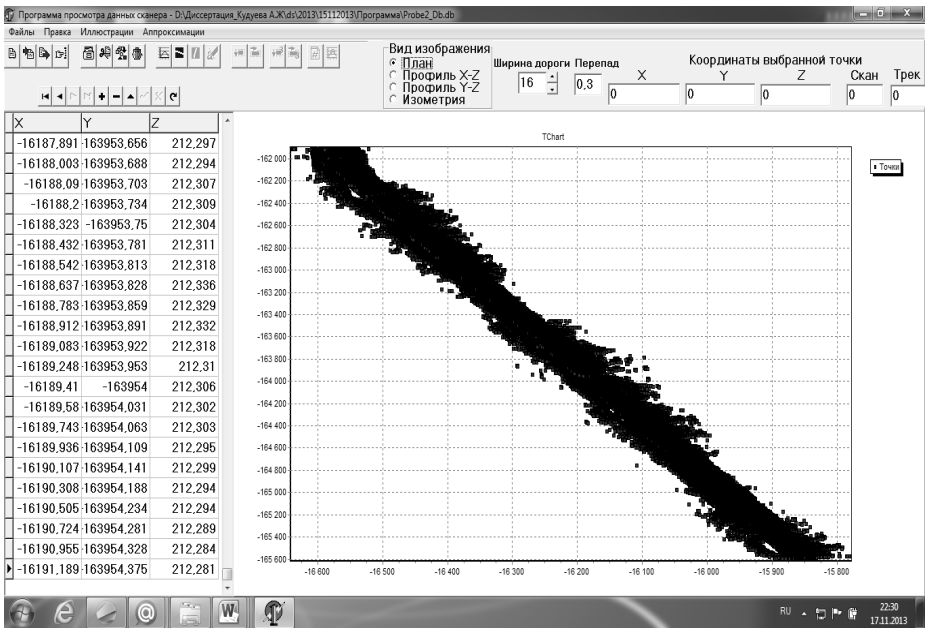


Рис. 4. Главное окно пакета после считывания «облака» данных лазерного сканирования

Результат экспорта обработанных с помощью данного пакета данных в систему автоматизированного проектирования автомобильных дорог Indog-CAD/Road [13] приведен на рис. 5.

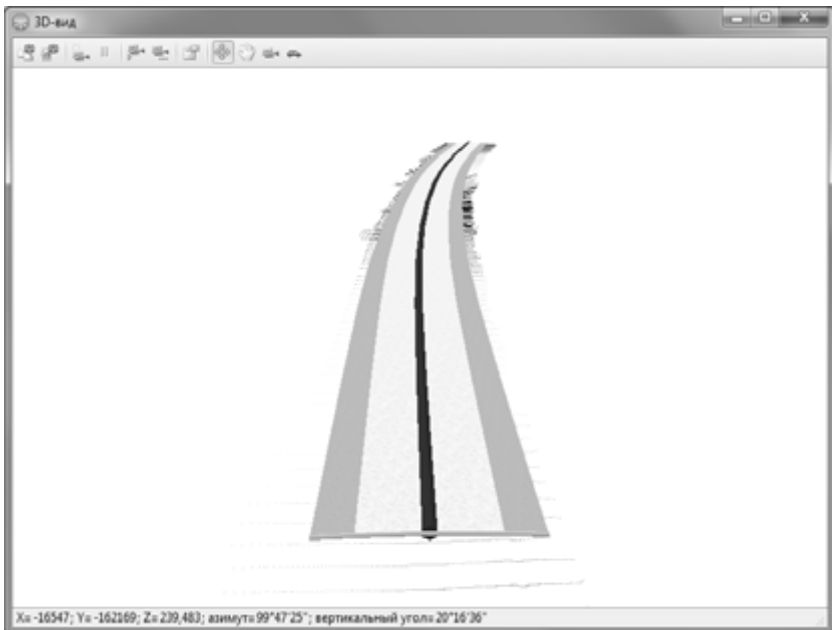


Рис. 5. 3D вид верха земляного полотна автомобильной дороги, запроектированной по восстановленной слайн-поверхности

Таким образом, с помощью разработанных на основе вейвлет-представлений алгоритмов могут быть решены основные проблемы обработки данных лазерного сканирования автомобильных дорог – это фильтрация шумов и сокращение объемов данных за счет удаления избыточной и несущественной информации, снижая тем самым вычислительные затраты на последующую обработку. Алгоритмы обработки данных, основанные на вейвлет-анализе (или анализе всплесков), достаточно просты и эффективны в реализации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Роджерс, Д.* Алгоритмические основы машинной графики : [пер. с англ.] / Д. Роджерс. – М. : Мир, 1989. – 512 с.
2. *Скворцов, А.В.* Триангуляция Делоне и её применение / А.В. Скворцов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
3. *Скворцов, А.В.* Построение сверхбольшой триангуляции Делоне / А.В. Скворцов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – № 6. – С. 22–26.
4. *Вейвлет-преобразование* и сжатие данных лазерного сканирования автомобильных дорог / А.Т. Бекмуратов, Г.А. Онопенко, А.Ж. Кудуев, Б.М. Шумилов, Э.А. Эшаров // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 4. – С. 228–238.
5. *Столниц, Э.* Вейвлеты в компьютерной графике : [пер. с англ.] / Э. Столниц, Т. ДеРоуз, Д. Салезин. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 272 с.
6. *Strela, V.* Multiwavelets: Theory and Applications: PHD Thesis (Math.) / V. Strela. – Cambridge. – Massachusetts, 1996. – 99 p.
7. *Jia, R.Q.* Wavelet bases of Hermite cubic splines on the interval / R.Q. Jia, S.T. Liu // *Advances Computational Mathematics*, 2006. – V. 25. – P. 23–39.
8. *Шумилов, Б.М.* Кубические мультивейвлеты, ортогональные многочлены и алгоритм с расщеплением / Б.М. Шумилов // Сибирский журнал вычислительной математики. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. – С. 283–297.
9. *Arandiga, F.* Discrete multiresolution based on hermite interpolation: computing derivatives / F. Arandiga, A. Baeza, R. Donat // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2004. – V. 9. – P. 263–273.
10. *Мирошниченко, В.Л.* Достаточные условия монотонности и выпуклости для интерполяционных сплайнов класса  $C^2$  / В.Л. Мирошниченко // *Приближение сплайнами*. – Новосибирск, 1990. – Вып. 137: Вычислительные системы. – С. 31–58.
11. *Алберг, Дж.* Теория сплайнов и ее приложения : [пер. с англ.] / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. – М. : Мир, 1972. – 350 с.
12. *Предварительная обработка* материалов лазерного сканирования автомобильных дорог / Д.А. Турсунов, Б.М. Шумилов, А.Н. Байгулов, С.Н. Колупаева // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 3 (32). – С. 184–191.
13. *Система проектирования IndorCAD.* Проектирование автомобильных дорог: руководство пользователя / И.В. Кривых, Д.А. Петренко, В.Н. Бойков [и др.] – 2-е изд., испр. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2010. – 250 с.

## REFERENCES

1. *Rodgers, D.P.* Improvements in multiprocessor system design. Moscow: Mir, 1989. 512 p. (transl. from Engl.)
2. *Skvortsov, A.V.* Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: TSU Publishing House, 2002. 128 p. (rus)
3. *Skvortsov, A.V.* Postroenie sverkhbol'shoi triangulyatsii Delone [Very large Delaunay triangulation plotting]. *News of Higher Educational Institutions. Physics*, 2002, No. 6, Pp. 22–26. (rus)

4. Bekmuratov, A.T., Onopenko, G.A., Kuduev, A.Zh., Shumilov, B.M., Esharov, E.A. Veivlet-preobrazovanie i szhatie dannykh lazernogo skanirovaniya avtomobil'nykh dorog [Wavelet transformation and data compaction of road laser scanning]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2011, No. 4, Pp. 228–238. (rus)
5. Stollnitz, E.J., DeRose, T.D., Salesin, D.H. Wavelets for Computer Graphic. Theory and Applications. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2002. 272 p. (transl. from Engl.)
6. Strela, V. Multiwavelets: Theory and Applications, PHD Thesis (Math.), Cambridge, Massachusetts, 1996. 99 p.
7. Jia, R.Q., Liu, S.T. Wavelet bases of Hermite cubic splines on the interval. *Advances Computational Mathematics*, 2006, V. 25, p. 23–39.
8. Shumilov, B.M. Kubicheskie mul'tiveivlety, ortogonal'nye mnogochlenam, i algoritm s rasshchepleniem [Cubic multi wavelets orthogonal to polynomials and splitting algorithm]. *Siberian Journal of Numerical Mathematics*. Novosibirsk: Siberian Branch Russian Academy of Sciences Publishing House, 2013. Pp. 283–297. (rus)
9. Arandiga, F., Baeza, A., Donat, R. Discrete multiresolution based on hermite interpolation: computing derivatives. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2004, V. 9, Pp. 263–273.
10. Miroshnichenko, V.L. Dostatochnye usloviya monotonnosti i vypuklosti dlya interpolatsionnykh splainov klassa C2 [Sufficient conditions of monotony and convexity for interpolated splines of C2 class]. *Priblizhenie splainami. Vychislitel'nye sistemy*. Novosibirsk, 1990. V. 137. Pp. 31–58. (rus)
11. Alberg, J.H., Nilson, E.H., Walsh, J.L. The theory of splines and their applications. Moscow: Mir, 1972. 350 p. (transl. from Engl.)
12. Tursunov, D.A., Shumilov, B.M., Baigulov, A.N., Kolupaeva, S.N. Predvaritel'naya obrabotka materialov lazernogo skanirovaniya avtomobil'nykh dorog [Pretreatment of materials for automobile road laser scanning]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2011. No 3. Pp. 184–191. (rus)
13. Krivykh, I.V., Petrenko, D.A., Boikov, V.N., et al. Sistema proektirovaniya IndorCAD [IndorCAD design system]. *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog: User guide*. Tomsk: TSU Publishing House, 2010. 250 p. (rus)

УДК 539.3:624.042.13

*KAIMING BI (КАЙМИНГ БИ),**bkm@civil.uwa.edu.au**HONG HAO (ХОНГ ХАО),**Школа строительной и ресурсной инженерии,**Университет Западной Австралии,**Стирлинг Шоссе, 35, Кроули, Зап. Австралия 6009, Австралия*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОТ СОУДАРЕНИЯ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА\***

Предыдущие исследования в области соударений с применением упрощенной модели с сосредоточенными массами или модели системы «балка – колонна» основаны, как правило, на предположении, что соударение происходит по точкам при ударных откликах мостовых структур на сейсмические нагрузки. Установлено, что эти упрощенные модели могут быть использованы для вычисления ударных откликов мостов с учетом лишь продольного возбуждения. В реальной конструкции моста соударение при сейсмических нагрузках может происходить по всей поверхности соседних сегментов или частично. Кроме того, крутильная реакция смежных настилов может привести к эксцентрическим соударениям соседних мостовых настилов вследствие асимметричности настила или пространственного изменения поперечных колебаний грунта при наличии нескольких мостовых опор. Необходима разработка детальной 3D-модели конечных элементов для учета взаимной реакции поверхностей и реакции на кручение, вызванных эксцентрическими соударениями и соответствующими повреждениями. В статье представлено численное моделирование повреждений от соударения между балками моста и между балкой моста и соответствующей опорой двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями при пространственном изменении колебаний грунта с применением детальной 3D-модели конечных элементов и программы LS-DYNA, реализующей явный метод конечных элементов. Моделируется также потенциал смещения и сноса моста. В модель включены такие элементы моста, как балки, береговые и промежуточные опоры, опорные части пролетного строения, продольная стержневая арматура и арматурные хомуты. Учитывается нелинейное поведение материала, в том числе влияние скорости деформации бетона и стальной арматуры. Представлено стохастическое моделирование пространственных изменений колебаний грунта. Рассматривается механизм повреждения моста при пространственных изменениях сейсмических нагрузок. Численные результаты показывают, что с помощью метода, предложенного в работе, можно в реальном времени отслеживать сейсмически индуцированные повреждения мостовых конструкций.

**Ключевые слова:** численное моделирование; ударное смещение; смещение; снос; 3D модель; механизм повреждения; нелинейный материал; неравномерное возбуждение.

---

\* Статья переведена и опубликована в «Вестнике ТГАСУ» согласно Лицензионному соглашению с издательством Elsevier № 3323420613044.

© 2014 Elsevier Ltd. Авторские права защищены.

© Кайминг Би (Kaiming Bi), Хонг Хао (Hong Hao), 2014

© Перевод на русский язык, оформление. ТГАСУ, 2014

© Издание, распространение на территории РФ. ТГАСУ, 2014

## Введение

Во время крупных землетрясений в мостовых конструкциях наблюдались различные типы повреждений. Мол (Moehle) и Эберхард (Eberhard) [1] исследовали эти типы повреждений и классифицировали их как повреждения наземных, опорных частей пролетного строения и оснований. Настоящая работа сосредоточена главным образом на изучении повреждений наземных частей. Наиболее распространенная форма повреждений наземных частей обусловлена соударением смежных сегментов компенсационных соединений. Например, на рис. 1, *а* и *б* показаны повреждения моста Санта-Клара, образовавшиеся в результате соударений балок моста и балки и опоры при землетрясении в Нортридже в 1994 г. Причиной повреждений явились зазоры компенсационных соединений, не вмещившие конечные относительные смещения [1]. Снос подферменной площадки может возникнуть, когда начальное относительное смещение превышает длину подферменной площадки, особенно мостов старых конструкций, проектировавшихся с короткими площадками. Большое относительное смещение в поперечном направлении может привести к дислокации смежных сегментов моста. На рис. 1, *в* и *д* показаны повреждения моста смещения Донгфенг в Чи-Чи после землетрясения [2] и путепровода автомагистрали по маршруту 5 после землетрясения в Чили в 2010 г. [3]. Эти виды повреждений наземных частей многократно наблюдались во время многих землетрясений. Их можно отнести к большим, сдвинутым по фазе перемещениям между соседними сегментами моста (как в продольном, так и в поперечном направлениях моста).

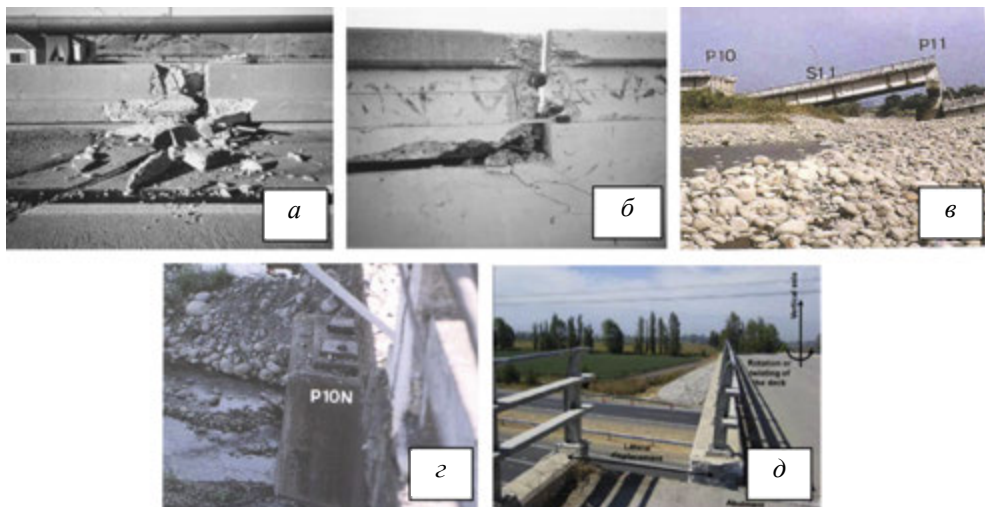


Рис. 1. Типичные повреждения, вызванные сейсмическим воздействием:  
*а, б* – повреждения от соударения; *в* – снос подферменной площадки; *г, д* – смещение

Существует много причин, приводящих к сдвинутым по фазе перемещениям, например, различные характеристики соседних конструкций моста,

пространственные колебания грунта и взаимодействие между основанием и окружающей почвой (взаимодействие грунта и конструкции). В статье описаны повреждения от соударения мостовых конструкций вследствие пространственного колебания грунта. В разд. 3 представлены исследования потенциала сноса и смещения моста.

Для мостовых сооружений с обычными компенсационными соединениями полное отсутствие соударений между различными компонентами при сильных землетрясениях часто невозможно, т. к. для обеспечения ровного потока автотранспорта зазоры компенсационных соединений составляют, как правило, всего несколько сантиметров. Соударение является чрезвычайно сложным явлением, включающим в себя повреждения в результате пластической деформации, локальное растрескивание и образование трещин в результате ударов и трения при контакте соседних элементов. Для упрощения анализа многие исследователи балку моста моделировали в качестве сосредоточенной массы [4–9] или узла «балка – колонна» [10–12]. Эффект соударения, как правило, моделируется с контактными элементами [4–8, 10–12]. Когда относительное перемещение между смежными компонентами больше, чем зазор между ними, активируется контактный элемент. Обычно он состоит из пружины и амортизатора для учета силы воздействия и рассеивания энергии при соударении. Преимуществом этого метода является ясность и легкая реализация в программах моделирования методом конечных элементов. Недостаток же метода состоит в предположении, что соударение происходит по точкам и место соударения предопределено. Таким образом, этот метод подходит для расчета характеристик соударения только при продольном возбуждении грунта. Кроме того, соударение между смежными конструкциями вызывает распространение волны напряжений в конструкции моста. Из-за высокой частоты и малой длительности соударения инерционное сопротивление ударной силе может иметь большое значение. Смоделировать его должным образом с помощью контактного элемента трудно, поскольку он не передает распространение волны напряжений.

В реальной конструкции моста при сейсмической нагрузке соударение может происходить по всей поверхности соседних сегментов. Следует отметить, что при предыдущих землетрясениях большинство соударений происходило в углах смежных балок моста, как показано на рис. 1, *а* и *б*. Это происходит потому, что крутильная реакция соседних балок, индуцированная пространственным изменением поперечных колебаний грунта при наличии нескольких мостовых опор, приводит к эксцентрическим соударениям. Для более реалистичной модели соударения между смежными конструкциями моста необходим подробный 3D анализ методом конечных элементов. Занардо (Zanardo) и др. [13] смоделировали балки моста с коробчатым сечением в качестве элементов оболочки, а промежуточные опоры – в качестве узла «балка – колонна» и исследовали явление соударения многопролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями с устройствами для изоляции фундамента. Джулиан (Julian) и др. [14] изучили эффективность ограничительных железных тросов для смягчения повреждений, вызванных землетрясением, посредством соединений между изолированными и неизолированными участками

изогнутых путепроводов с использованием нелинейного 3D анализа методом конечных элементов. Несмотря на то, что в этих исследованиях [13, 14] были разработаны 3D модели конечных элементов конструкций моста, в них не рассматривалось ни соударение поверхностей, ни эксцентричное соударение. Вместо этого было смоделировано соударение контактным элементом, который связывал вместе внешние узлы смежных сегментов. Другими словами, места соударения были предопределены моделированием, хотя на самом деле соударение может произойти в любой точке вдоль смежных поверхностей мостового настила благодаря поперечной и крутильной реакциям. Чжу (Zhu) и др. [15] предложили 3D модель «контакт – трение» для анализа соударения между балками трехпролетного стального моста. Го (Guo) и др. [16] изменили эту модель, используя другой тип элемента «контакт – трение» и изучили ее точность, проведя ряд испытаний на вибростенде для автодорожных мостов. Эти модели [15, 16] устранили ограничения предыдущих исследований в плане предопределения мест соударения и тем самым обеспечили более реалистичное моделирование реакции соударения между балками моста. Недостатком этих методов является то, что из-за соударения нелинейность материала и повреждение конструкций не моделируются, и варианты сейсмических пространственных колебаний грунта не рассматриваются. Задача поиска контактных пар требует больших временных затрат, и алгоритм поиска также затруднен. Совсем недавно Би (Bi) и др. [17] вновь изучили многопролетный бетонный мост, ранее исследованный Малхотрой (Malhotra) [4] с помощью 3D модели конечных элементов. Результаты, полученные с помощью этой модели и программы LS-DYNA [18], сравнивали с результатами, полученными с помощью традиционной модели с сосредоточенными массами и модели элемента «балка – колонна», с применением контактного элемента для моделирования эффекта соударения. Была подтверждена эффективность использования 3D модели, основанной на LS-DYNA для расчета реакции соударения. Численные результаты [17] показали, что модель с сосредоточенными массами и модель «балка – колонна» дают хорошие прогнозы в случае, если реакции моста ограничиваются продольным направлением. При крутильной и поперечной реакциях модель с сосредоточенной массой и модель «балка – колонна» не в состоянии определить сопутствующие эксцентрические соударения. Би и др. [19] разработали 3D модель конечных элементов двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями, расположенного на участке каньона для расчета реакции соударения на многокомпонентные пространственные изменения колебаний грунта. В данном исследовании рассматриваются взаимная реакция поверхностей и крутильная реакция, вызванные эксцентрическим соударением. Тем не менее, следует отметить, что рассчитывались только линейные упругие отклики, нелинейные свойства материала и соударения, вызванные местным повреждением, не изучались.

Другим важным фактором, влияющим на поведение соударения между соседними элементами моста, является пространственное изменение сейсмических колебаний грунта, т. к. они ведут к несинхронным реакциям соседних конструкций. Пространственные колебания грунта могут быть вызваны множеством причин, такими как эффект прохождения волн в резуль-

тате различного времени вступления сейсмических волн в разных местах, эффект потери когерентности вследствие рассеяния сейсмических волн в неоднородной среде земли и эффект усиления за счет различных свойств почвы в различных местах [20]. Из-за трудностей моделирования пространственного движения грунта во многих исследованиях предполагается, что возбуждение равномерно [4, 6, 7, 12, 14–17] или что изменение вызвано только эффектом прохождения волн [5, 10]. Лишь в нескольких исследованиях рассмотрено сочетание эффектов прохождения волны и потери когерентности при анализе реакции относительного смещения смежных конструкций моста [8, 9, 11, 13]. Следует отметить, что во всех вышеупомянутых исследованиях ученые пренебрегли влиянием местного грунта. В действительности влияние местного грунта не только приводит к дальнейшей разности фаз [20], но и влияет на потерю когерентности между пространственными колебаниями грунта [21]. Эти различия, в свою очередь, существенно влияют на структурные характеристики. Насколько известно авторам, комплексных исследований комбинированного влияния прохождения волны, потери когерентности и местного грунта на реакцию соударения мостовых сооружений не проводилось, за исключением [19], где рассматриваются только линейные характеристики упругости моста.

В данной работе изучено соударение между опорой и соседней балкой моста и между двумя соседними балками двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями, расположенного на участке каньона. Детальная 3D-модель конечных элементов моста, построенная в ANSYS [22] и LS-DYNA [18], используется для расчета реакций конструкции. Стохастическое моделирование на основе метода, недавно предложенного авторами [23], применено в отношении двунаправленных, изменяющихся в пространстве колебаний грунта с учетом эффектов прохождения волны, потери когерентности и местного грунта. Статья является продолжением предыдущей работы [19]. Основные различия настоящей работы и результатов предыдущего исследования:

1) рассмотрение моста с более короткой длиной пролета, равной 30 м, вместо 50 м в предыдущем исследовании;

2) более детальная 3D модель, которая включает в себя стержневую арматуру и хомуты, вместо размытой модели RC, предложенной в предыдущем исследовании;

3) рассмотрение нелинейности материалов;

4) повреждения, вызванные соударением с использованием задокументированных моделей повреждений с учетом конкретного материала и арматуры;

5) более реалистичное моделирование опорных частей пролетного строения твердым элементом вместо элемента «пружина – амортизатор», использованного в предыдущем исследовании;

6) расчет повреждений подферменной площадки и дислокации мостового настила. Следует отметить, что взаимодействие системы «грунт – конструкция» в работе не рассматривается.

## 1. Модель моста

### 1.1. Подробное описание

На рис. 2, *а* показан вид сбоку двухпролетного моста через каньон со свободно опертыми пролетными строениями. Балки моста коробчатого сечения (рис. 2, *б*) имеют длину 30 м. L-образная опора составляет 7,56 м в поперечном направлении, а ее поперечное сечение показано на рис. 2, *в*. Высота прямоугольной промежуточной опоры составляет 12 м с сечением, приведенном на рис. 2, *г*. Для поддержки балок моста на опорах с сечением (рис. 2, *д*) используется 8 неопределенных несущих структур. Для учета сжатия и расширения балок моста вследствие ползучести, усадки, колебания температуры и движения без генерации сил связи в структуре делается зазор 50 мм между опорой и балкой моста и между соседними балками моста. Следует отметить, что боковые ограничители, которые обычно применяются на практике, не рассматриваются в этой модели. Мостовые опоры могут свободно вибрировать в поперечном направлении  $Z$  при отсутствии соударения.

Стальная арматура диаметром 20 и 16 мм располагается в балке моста с интервалом 120 и 180 мм для первичной арматуры и хомутов соответственно. В опоре диаметр всей арматуры составляет 16 мм, и она располагается с интервалом 180 мм. Все бетонные элементы имеют защитный слой 60 мм на стержневой арматуре.

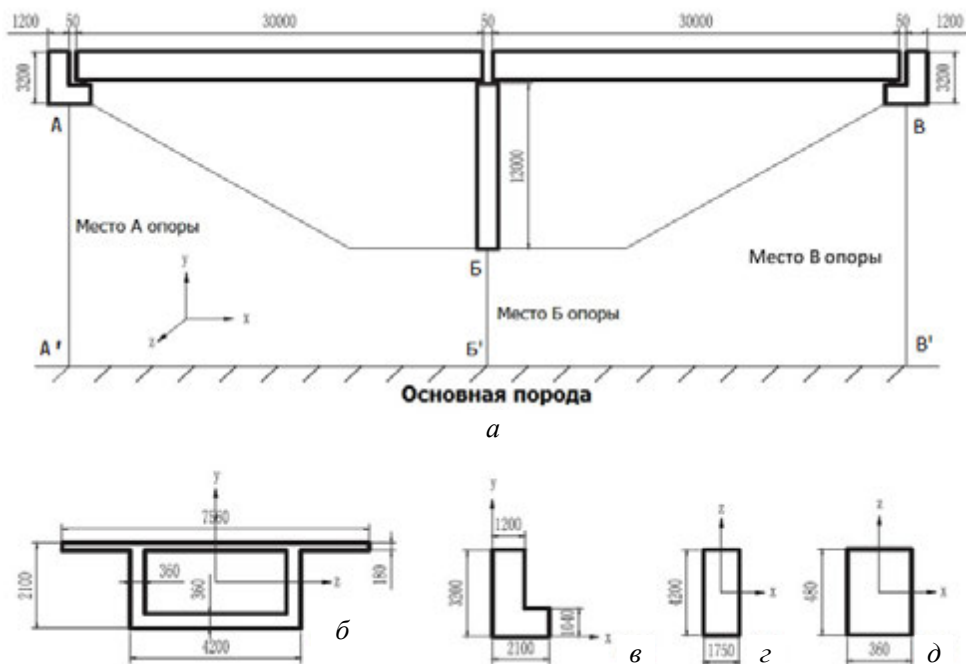


Рис. 2. Двухпролетный мост через каньон:

- а* – высота над уровнем моря, вид моста сбоку;
- б* – поперечное сечение балки моста;
- в* – поперечное сечение опоры;
- г* – поперечное сечение промежуточной опоры;
- д* – поперечное сечение несущей конструкции (не в масштабе, ед. измерения мм)

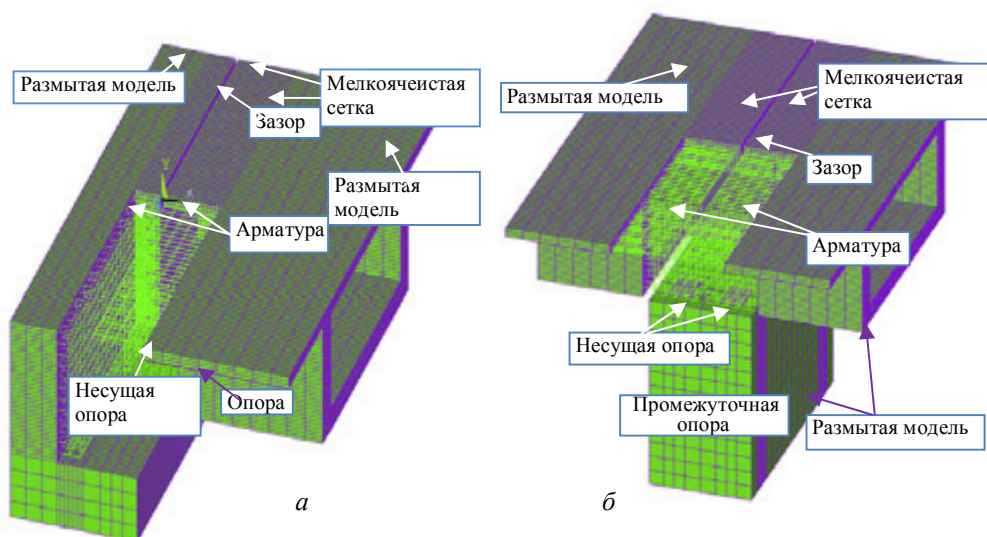


Рис. 3. Детальная модель конечных элементов моста:  
*а* – вокруг левого зазора: *б* – вокруг среднего зазора

Мост расположен на участке каньона, состоящего из горизонтально расширенных слоев почвы на промежуточной площадке (основной породе). Точки А, Б и В – это три места опор моста на поверхности земли, которым соответствуют точки А', Б' и В' на основной породе. Глубина для трех участков составляет 42, 30 и 42 м соответственно. Основания моста считаются жестко закрепленными. Следует отметить, что система «грунт – конструкция» влияет на поведение моста, как сообщалось в предыдущих исследованиях [8, 9, 24]. В настоящем исследовании система «грунт – конструкция» не рассматривается, с тем чтобы сосредоточить внимание на трехмерных реакциях, вызванных повреждением от соударения.

## 1.2. Свойства элемента, граничные условия и контактная поверхность раздела

В данном исследовании для всех бетонных элементов используются объемные элементы под постоянной нагрузкой. При проведении численного испытания на сходимость различных размеров сетки (30, 60 и 120 мм) было обнаружено, что сетка с ячейками 60 мм дает те же результаты, что и сетка с меньшим размером ячеек, но времени на вычисления уходит гораздо меньше. Из-за размеров рассматриваемого моста и с учетом того факта, что реакция соударения при сейсмических нагрузках очень ограничена по месту, мелкоячеистая сетка применяется только в наклонных местах соударения. В частности, детальное моделирование с помощью сетки с ячейками 60 мм применяется только к балкам длиной 0,96 м от каждого конца балки и к опорам длиной 0,42 м. За пределами этих областей размер ячеек в продольном направлении составляет 0,3 м. Одинаковый размер сетки используется для балки Бельшко при моделировании стержневой арматуры в наклонных ме-

стах соударения. Для моделирования считается, что между арматурой и бетоном существует идеальная связь. Таким образом, скольжение арматуры в бетоне берется как свойство, полностью зависимое от разрушения бетона. Для областей, расположенных достаточно далеко от мест соударения, используются размытые модели (т. е. предполагается, что арматура равномерно распределена по бетонному элементу) с целью минимизации вычислительных затрат. Поскольку в настоящем исследовании изучается только реакция соударения мостового настила и опор, для моделирования центральной опоры также используются размытые составляющие железобетона. Неопреновые несущие опоры моделируются с использованием полностью интегрированных трехмерных элементов. На рис. 3 показана детальная конечно-элементная модель моста.

Для моделирования контактных поверхностей между сетками принят метод штрафа, благодаря его эффективности и простоте при подробном анализе. Этот метод ограничивает проникновение подчиненных узлов между диагностическими узлами и контактными поверхностями посредством воображаемых пружин нормальной границы раздела [18]. Для предотвращения проникновения на стыке мостовых балок и находящихся внизу неопреновых несущих опор используется алгоритм взаимной реакции поверхности \*CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE в LS-DYNA. Нижняя поверхность опорных частей пролетного строения имеет узлы, общие с соответствующими несущими или промежуточными опорами. Как будет показано в разд. 3, мостовые балки могут упасть с опорных частей на береговые или промежуточные опоры из-за больших поперечных относительных возмущений. В этом случае также принят этот алгоритм для имитации контакта между нижней плитой балки моста и верхней поверхностью упоров либо промежуточных опор. Эффективность использования алгоритма контакта для моделирования удара между соседними сегментами конструкции моста (т. е. соударения между опорой и соответствующей балкой моста или соударения между соседними балками моста) была подтверждена в [17], и она будет снова применена в настоящем исследовании для моделирования потенциальных соударений. При использовании алгоритма контакта следует установить значение динамического и статического сухого трения, при этом в данном исследовании оба вида трения считаются равными 0,5 [25, 26].

### 1.3. Модель деформирования материала

В данной работе обе модели деформирования материала \*MAT CONCRETE DAMAGE REL3 (MAT\_72REL3) и \*MAT PSEUDO TENSOR (MAT\_16) используются для моделирования бетона.

Модель MAT\_REL3 применяется в местах с мелкоячеистой сеткой, а MAT\_16 – для моделирования размытого материала в местах, которые считаются не затронутыми ударной реакцией и, следовательно, в подробном анализе не нуждаются. Преимущество этих двух моделей деформирования материала состоит в том, что они могут моделировать сложное поведение бетона, показывая неограниченную прочность на сжатие даже при отсутствии подробных экспериментальных данных о составляющих бетона. Эти две модели

были получены на основе многочисленных экспериментальных данных. Они, в частности MAT\_72REL3, были использованы и проверены многими исследователями, дав хорошие прогнозы динамическим характеристикам составляющих бетона и повреждениям от ударных нагрузок (например, [27, 28]).

Чтобы избежать перегрузки компьютера во время расчета, используется карта \*MAT ADD EROSION для устранения элементов, которые в процессе анализа не способствуют сопротивлению сейсмическим нагрузкам. В настоящем исследовании бетонная армирующая сетка будет удалена, когда максимальная главная деформация достигнет 0,15. Следует отметить, что эрозионный метод обычно используется при непрерывном конечно-элементном моделировании больших деформаций материала, чтобы избежать запутывания элементов и компьютерной перегрузки. Это только численная манипуляция, и она не имеет физического смысла. Кроме того, удаление элементов нарушает массу и энергосбережение. Поэтому эрозионный метод следует использовать с осторожностью. В данной работе относительно большое напряжение 0,15 принимается в качестве критерия эрозии. Этот критерий был использован другими исследователями и показал целесообразность применения моделирования повреждений составляющих бетона [27].

Модель \*MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY (MAT\_24) используется для моделирования стальной арматуры в мостовых балках и опорах. Преимущество этой модели материала состоит в том, что она позволяет определять произвольные кривые зависимости деформаций от напряжения и является экономически эффективной для рассмотрения изотропного и кинематического упрочнения пластичности, включая влияние скорости деформации.

Мост имеет восемь типичных неармированных эластомерных несущих опор, каждая моделируется с 16 конечными элементами. Вязкоупругая модель материала \*MAT VISCOELASTIC (MAT\_6) моделирует несущие опоры, которые определяются модулем кратковременного сдвига и модулем долговременного или бесконечного сдвига. Свойства модели вязкоупругого материала, описанные в [29], заимствованы для данной работы и приведены в табл. 1.

#### 1.4. Влияние скорости деформации

Прочность конструкционных материалов зависит от скорости деформации, т. к. их динамические свойства могут возрасти при таких воздействиях, как взрыв или землетрясение. В настоящем исследовании используется коэффициент динамического повышения, т. е. отношение динамической прочности к статической против скорости деформации для повышения прочности материала с эффектом скорости деформации.

Для упрочнения бетона в работе используется билинейное отношение, разработанное программой СЕВ [30], Мавларом (Malvar) и Россом (Ross) [31]. При напряжении коэффициент динамического повышения прочности на растяжение представлен следующими уравнениями [31]:

$$\text{TDIF} = \frac{f_t}{f_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ts}} \right)^\delta \quad \text{для } \dot{\epsilon} \leq 1\text{c}^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{TDIF} = \frac{f_t}{f_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ts}} \right)^{1/3} \quad \text{для } \dot{\epsilon} > 1\text{c}^{-1}, \quad (2)$$

где  $f_t$  – предел динамической прочности при скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  в диапазоне  $10^{-6}$ – $160 \text{ c}^{-1}$ ;  $f_{ts}$  – статическая прочность на растяжение при  $\dot{\epsilon}_{ts}$ ,  $\log \beta = 6\delta - 2$ ,  $\delta = 1/(1 + 8\int_c/\int_{co})$ ;  $\int_c$  – статическая одноосная прочность при сжатии бетона, МПа;  $\int_{co}$  считается равным 10 МПа.

При сжатии уравнения представлены программой СЕВ следующим образом [30]:

$$\text{CDIF} = \frac{f_t}{f_{cs}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{cs}} \right)^{1,02\alpha} \quad \text{для } \dot{\epsilon} \leq 30\text{c}^{-1}, \quad (3)$$

$$\text{CDIF} = \frac{f_t}{f_{cs}} = \gamma(\dot{\epsilon})^{1/3} \quad \text{для } \dot{\epsilon} \leq 30\text{c}^{-1}, \quad (4)$$

где  $f_c$  – динамическая прочность при сжатии при скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ ;  $f_{cs}$  – статическая прочность при сжатии при  $\dot{\epsilon}_{cs}$ ,  $\log \gamma = 6,156\alpha - 0,49$ ,  $\alpha = 1/(5 + 3f_{cu}/4)$ ;  $f_{cs}$  – статическая кубиковая прочность, МПа.

Модель К&С [32] принята для определения коэффициента динамического повышения для арматуры, которая задана отношением

$$\text{DIF} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right)^\alpha, \quad (5)$$

$$\alpha = 0,074 - 0,040 f_y/414, \quad (6)$$

где  $f_y$  – предел текучести арматуры, МПа.

Таблица 1

## Свойства материала

Материал	Расположение	Модель LS-DYNA	Параметр	Значение
Бетон	Мелкоячеистая сетка на балках моста	*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_72REL3)	Массовая плотность	2400 кг/м <sup>3</sup>
			Прочность на сжатие	50 МПа
	Размытый бетон на балках моста	*MAT_PSEUDO_TENSOR (MAT_16)	Массовая плотность	2400 кг/м <sup>3</sup>
			Модуль сдвига	14,37 ГПа
			Коэффициент Пуассона	0,3
			Процент армирования	2,0 %
	Мелкоячеистая сетка на опорах моста	*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_72REL3)	Массовая плотность	2400 кг/м <sup>3</sup>
			Прочность на сжатие	30 МПа

Окончание табл. 1

Материал	Расположение	Модель LS-DYNA	Параметр	Значение
	Размытый бетон на опорах моста	*MAT_PSEUDO_TENSOR (MAT_16)	Массовая плотность Модуль сдвига Коэффициент Пуассона Процент армирования	2500 кг/м <sup>3</sup> 12,5 ГПа 0,3 1,2 %
	Размытый бетон на промежуточной опоре	*MAT_PSEUDO_TENSOR (MAT_16)	Массовая плотность Модуль сдвига Коэффициент Пуассона Процент армирования	2500 кг/м <sup>3</sup> 12,5 ГПа 0,3 1,2 %
Арматура	Опоры/балки моста	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_24)	Плотность Модуль Юнга Коэффициент Пуассона Нижний предел текучести Предел прочности Касательный модуль Деформация при разрушении	7850 кг/м <sup>3</sup> 200 ГПа 0,3 550 МПа 660 МПа 1600 МПа 0,12
Неопределенные опоры	Несущая опора	MAT_VISCOELASTIC (MAT_6)	Массовая плотность Модуль объемной упругости Модуль кратковременного сдвига Модуль бесконечного сдвига	2300 кг/м <sup>3</sup> 182 МПа 18,35 МПа 17,32 МПа

### 1.5. Вибрационные характеристики

С учетом вышеизложенного, вибрационные частоты и соответствующие формы колебаний моста могут быть получены путем расчета собственных чисел. Обнаружено, что первый вибрационный режим в поперечном (направление  $z$ ), продольном (направление  $x$ ) и вертикальном (направление  $y$ ) направлениях является первым, третьим и седьмым общим режимом суммарной вибрации конструкции с частотой 0,935, 1,102 и 2,106 Гц соответственно.

## 2. Пространственное изменение колебаний грунта

Для конструкции моста, показанной на рис. 2, эффекты прохождения волн и потери когерентности при пространственном изменении колебаний грунта будут незначительными благодаря коротким пролетам моста. Однако местный грунт существенно изменит амплитуду и частотный спектр входящих волн на основной породе благодаря эффектам усиления и фильтрации. Традиционный способ моделирования пространственного изменения движений грунта (например, [33]) основан на предположении о пологости местных грунтов, поэтому их влияние не учитывается. При таком предположении колебания грунта на трех площадках на поверхности земли имеют одинаковую интенсивность и частотный спектр. Таким образом, традиционные способы не подходят для моделирования пространственного изменения колебаний грунта на участке каньона, как показано на рис. 2. Недавно авторы [23] разработали приближенный метод стохастического моделирования пространственного изменения колебаний на поверхности каньона. Этот метод предполагает, что движения основной породы состоят из боковых SH-волн и сочетания плоских P- и SV-волн, распространяющихся на площадку с условным углом падения. Функция спектральной плотности мощности на основной породе предполагается такой же и моделируется фильтрованной функцией спектральной плотности мощности Tajimi-Kanai [34]. Пространственное изменение колебаний грунта на основной породе моделируется эмпирической функцией когерентности, действие местного грунта – с помощью теории распространения одномерных волн [35]. Функции спектральной плотности мощности горизонтальных плоских, горизонтальных боковых и вертикальных плоских колебаний на поверхности земли могут быть определены с учетом передаточных функций площадки в соответствующих направлениях. Трехмерные пространственные изменения колебаний на поверхности земли могут быть смоделированы с использованием подхода, аналогичного традиционному методу. Этот подход соотносит эффект усиления с условиями местных грунтов и может определить многократные режимы вибраций площадок, поэтому он более реалистично имитирует многокомпонентные пространственные изменения колебаний на поверхности каньона. Подробная информация о технике моделирования представлена в [23].

Интенсивность движения грунта в точках A', B' и B' на основной породе считается одинаковой и имеет вид

$$S_g(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f\omega\xi_f)^2} \frac{1 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \Gamma, \quad (7)$$

где  $\omega_g$  и  $\xi_g$  – центральная частота и коэффициент затухания функции спектральной плотности мощности Tajimi-Kanai;  $\omega_f$  и  $\xi_f$  – центральная частота и коэффициент затухания и функция фильтра высоких частот соответственно.  $\Gamma$  – коэффициент масштабирования, зависящий от интенсивности движения грунта. Анализ предполагает, что боковое горизонтальное движение состоит только из SH-волны, в то время как плоские горизонтальные и вертикальные колебания сочетаются с P- и SV-волнами. Параметры горизонтального коле-

бания предполагаются равными  $\omega_g = 10\pi$  рад/с;  $\xi_g = 0,6$ ;  $\omega_f = 0,5\pi$ ;  $\xi_f = 0,6$  и  $\Gamma = 0,0232$  м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>. Эти параметры соответствуют динамике изменения колебаний грунта длительностью  $T = 16$  с и 0,5 г на основе стандартного метода случайных колебаний [36].

Модель Собчика (Sobczyk) [37] выбрана для описания потери когерентности между движениями грунта в точках  $j'$  и  $k'$  (где  $j'$ ,  $k'$  соответствуют А', Б' и В') на основной породе:

$$\begin{aligned} \gamma_{j'k'}(i\omega) &= |\gamma_{j'k'}| \exp(-i\omega d_{j'k'} \cos \alpha / v_{app}) = \\ &= \exp(-\beta \omega d_{j'k'}^2 / v_{app}) \exp(-i\omega d_{j'k'} \cos \alpha / v_{app}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий уровень потери когерентности. Поскольку длина пролетов моста коротка и эффект потери когерентности при пространственном колебании основной породы, как упоминалось выше, не существенен, в настоящей работе рассматриваются только слабо корректируемые колебания грунта при  $\beta = 0,0025$ ;  $d'_{kk'}$  – расстояние между точками  $j'$  и  $k'$ . Для данной конструкции моста  $d_{A'B'} = d_{B'C'} = 30$  м и  $d_{A'C'} = 60$  м;  $v_{app}$  – кажущаяся скорость волны на основной породе, которая связана с ее свойствами и углом падения  $\alpha$ . Здесь с заданными свойствами местной площадки (табл. 2) и предполагаемым углом падения  $\alpha = 45^\circ$ ,  $v_{app} = 1095$  м/с.

Таблица 2

### Параметры условий местных грунтов

Тип	Плотность, кг/м <sup>2</sup>	Модуль сдвига, МПа	Коэффициент затухания	Коэффициент Пуассона
Основная порода	3000	1800	0,05	0,33
Твердый грунт	2000	320	0,05	0,4
Рыхлый грунт	1600	60	0,05	0,4

Для упрощения рассмотрим только один слой на основной породе. Для изучения условий местных грунтов рассматриваются два их типа: твердый и рыхлый. Грунт под промежуточной опорой (место Б) считается твердым, а грунт под двумя опорами (места А и В) – как твердым, так и рыхлым и обозначен буквами 'FFF' и 'SFS' соответственно для трех рассматриваемых мест, где 'F' означает твердый (firm), а 'S' – мягкий (soft). В табл. 2 приведены соответствующие параметры грунтов и основной породы.

С помощью предложенного подхода [23] и заданных параметров местных грунтов можно смоделировать горизонтальные плоские, горизонтальные боковые и вертикальные плоские колебания на поверхности земли. Частота дискретизации и верхняя частота среза заданы 100 и 25 Гц соответственно, а продолжительность времени предполагается равной  $T = 16$  с. Следует отметить, что величина вертикального компонента обычно меньше, чем горизон-

тального. Как отмечалось в разд. 1, первый вертикальный режим вибрации – это седьмой режим с частотой вибрации 2,106 Гц. Таким образом, влияние вертикального компонента на продольные и поперечные характеристики конструкции незначительно. В настоящем исследовании рассматриваются только горизонтальное колебания.

На рис. 4 и 5 показана динамика изменения двунаправленного ускорения и смещения, изменяющихся в пространстве на поверхности земли, в соответствии с условиями грунта 'SFS'.

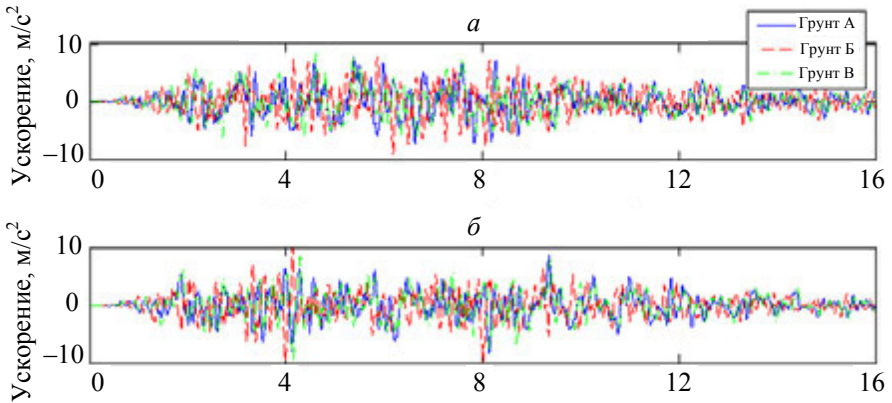


Рис. 4. Динамика изменения ускорения в условиях грунта *SFS*:  
*а* – горизонтальное плоское колебание; *б* – горизонтальное боковое колебание

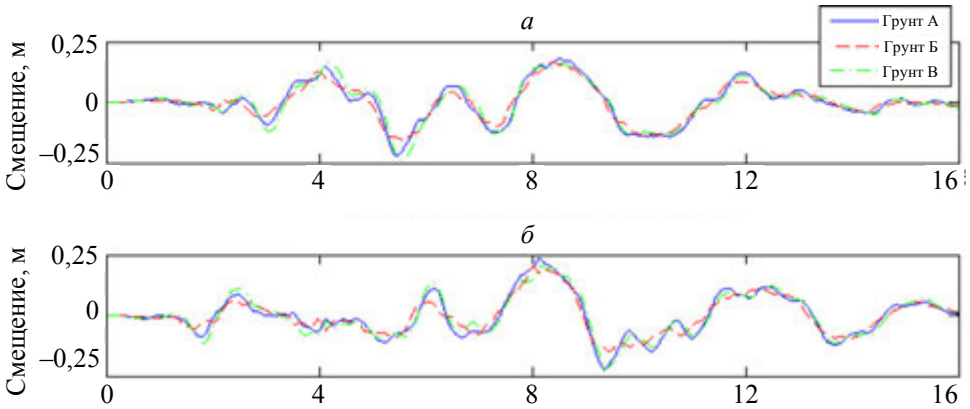


Рис. 5. Динамика смещения ускорения в условиях грунта *SFS*:  
*а* – горизонтальное плоское колебание; *б* – горизонтальное боковое колебание

На рис. 6 представлено хорошее соответствие между моделируемыми спектральными плотностями мощности и теоретическими значениями горизонтальных плоских колебаний. Для краткости не показаны сравнения горизонтальных боковых колебаний, где также наблюдается хорошее соответствие. Согласно работе [21], функция потери когерентности различна между

колебаниями на поверхности земли на основной породе. Пространственные колебания грунта на поверхности земли коррелируют в наименьшей степени при существенном отличии спектральных отношений двух местных грунтов. В настоящем исследовании влияние условий местных грунтов на потерю пространственной когерентности не рассматривается. Более подробную информацию можно найти в работе [21]. Следует отметить, что моделируемые пространственные колебания грунта, соответствующие 'FFF' условиям, вполне соответствуют значениям модели.

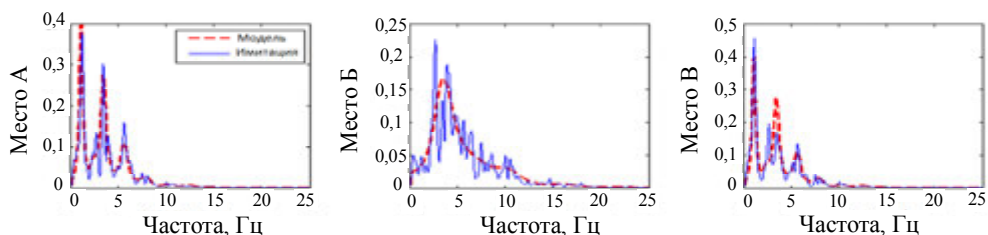


Рис. 6. Сравнение моделируемых спектральных плотностей мощностей с теоретическими значениями горизонтальных плоских колебаний (грунт *SFS*)

При анализе поведения моста в качестве входных данных используется моделирование горизонтальных плоских и боковых колебаний различных мостовых опор соответственно в продольном и поперечном направлениях.

### 3. Численные результаты

В этом разделе исследуется сейсмическое повреждение двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями, показанное на рис. 2, с помощью детальной 3D модели конечных элементов и программы LS-DYNA. Поскольку использовалось решающее устройство, все нагрузки, включая гравитационную, принимались в качестве динамических. В результате действие силы тяжести также подвергается динамическому увеличению. Этот нежелательный динамический эффект устраняется методом динамической релаксации в LS-DYNA, т. е. вычисление выполняется в два этапа. На первом этапе используется метод динамической релаксации для изучения гравитационной (статической) нагрузки, а полученные результаты применяются в качестве исходных условий для последующего подробного анализа сейсмических нагрузок, проводимого на втором этапе.

#### 3.1. Влияние двунаправленных колебаний грунта

Большинство предыдущих исследований в области сейсмических ударных нагрузок касаются только продольного возбуждения. В действительности пространственные поперечные колебания одновременно возбуждают и мостовые конструкции с продольными колебаниями, и они генерируют не только поперечную, но и крутильную реакцию моста, которая, в свою очередь, может привести к эксцентрическим соударениям, как отмечалось выше. Реакция конструкции с учетом двунаправленных (2D)

возбуждений грунта (продольное и поперечное направления), таким образом, отличается от реакции с однонаправленными 1D (продольными) возбуждениями. В этом разделе рассматривается влияние 2D колебаний. Условия грунта – 'SFS'.

На рис. 7 приведено сравнение динамики изменения равнодействующих сил соударения в продольном направлении разных компенсационных соединений, вызванных различными возбуждениями колебания грунта.

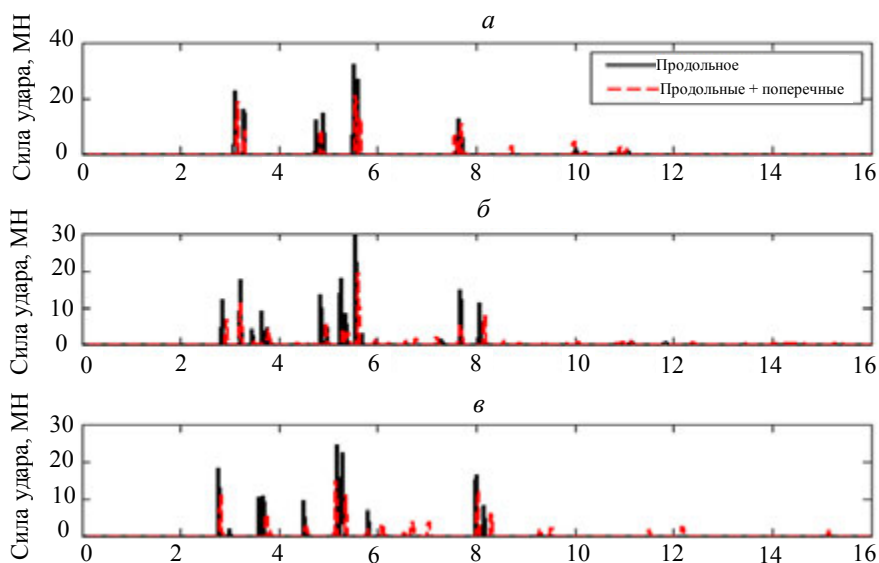


Рис. 7. Сравнение равнодействующих сил соударения, возникающих при 1D и 2D возбуждениях грунта:

а – левый зазор; б – средний зазор; в – правый зазор

Компоненты в поперечном и вертикальном направлениях не представлены из-за сил трения во время контакта, и, следовательно, их величины намного меньше величин продольного направления. Очевидно, что 1D продольное возбуждение приводит к появлению больших ударных сил. Взяв ударные силы на левом зазоре в качестве примера, видим, что максимальные силы для 1D и 2D возбуждений равны 32,4 и 21,3 МН соответственно. Традиционный метод, учитывающий 1D возбуждение, завышает оценку сил соударения. Это происходит потому, что при 1D продольном возбуждении соседние компоненты мостовой конструкции испытывают соударение фронтальных поверхностей. С другой стороны, при 2D возбуждении крутильные реакции, происходящие в результате разнообразных поперечных колебаний грунта различных опор, ведут к эксцентрическим соударениям. При 2D возбуждении наблюдается большее количество соударений, но меньшее – ударных сил. Это происходит потому, что если мост реагирует только в одном направлении, то вся масса мостового настила участвует в соударении, что приводит к большей ударной силе вследствие большого инерционного сопротивления, тогда как лишь частичная масса

настила будет способствовать инерционному сопротивлению при крутильном или эксцентрическом соударениях. Как показано на рис. 7, при 1D возбуждении столкновения между соседними элементами в левом, среднем и правом зазорах составляют 8, 16 и 9 раз соответственно. Однако при 2D возбуждениях количество соответствующих соударений – 11, 27 и 17 раз.

Как видно из рис. 7, в обоих случаях наблюдается больше столкновений в среднем зазоре между двумя балками, чем в левом и правом зазорах между балкой и опорой. Это происходит потому, что соударение в левом и правом зазорах возникает, когда относительное смещение между мостовой балкой и соответствующей опорой больше, чем разделительный зазор, а в среднем зазоре оно определяется относительным смещением между смежными балками моста. По сравнению с опорой моста продольная жесткость балки намного меньше, благодаря относительно мягким несущим опорам мостового настила. Настил, таким образом, будет скорее всего вибрировать при сейсмических нагрузках и генерировать большее количество соударений.

На рис. 8 и 9 показаны повреждения от соударения мостовых балок, полученные с учетом 1D и 2D возбуждений соответственно.

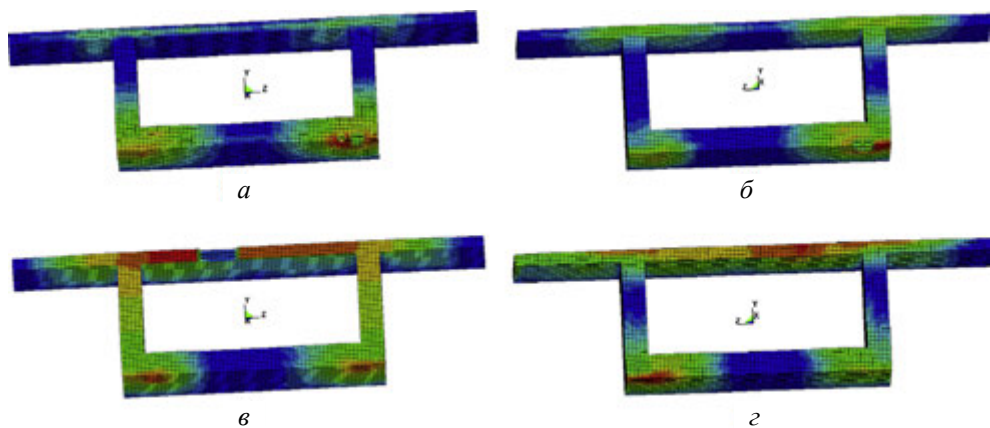


Рис. 8. Повреждения от соударения балок моста при 1D возбуждении:

*а* – левый конец левой балки; *б* – правый конец левой балки; *в* – левый конец правой балки; *г* – правый конец правой балки

Как показано на рис. 8, 1D возбуждение приводит к незначительным повреждениям балок или не приводит к повреждениям вообще (правый конец правой балки). Однако при 2D возбуждении полка, стенка и нижняя плита балки моста страдают от серьезных повреждений (рис. 9). Можно заметить, что эти повреждения соответствуют результатам последних крупных землетрясений (рис. 1, *а* и *б*). Интересно, что большие ударные силы не обязательно приводят к более серьезным повреждениям мостовых балок. Это происходит потому, что повреждение контролируется максимальной главной деформацией, как отмечалось в разд. 1, которая связана не только с ударной силой, но и с фактической контактной поверхностью в каждый момент удара. При 1D возбуждении соударение происходит по всей поверх-

ности, в то время как 2D возбуждения ведут к эксцентрическим соударениям. Контактная поверхность при 1D возбуждении намного больше, чем при 2D возбуждении. Максимальная главная деформация, таким образом, может быть меньше, хотя сила удара больше.

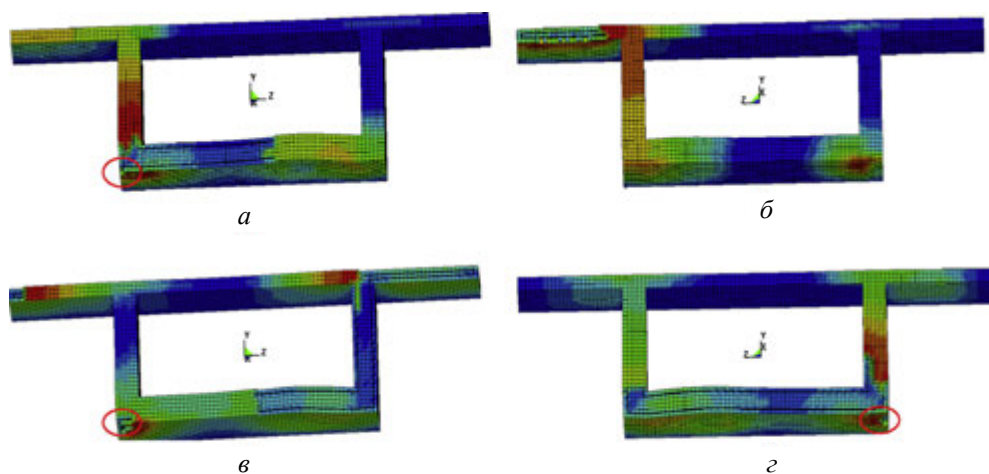


Рис. 9. Повреждения от соударения балок моста при 2D возбуждении:

*a* – левый конец левой балки; *б* – правый конец левой балки; *в* – левый конец правой балки; *г* – правый конец правой балки

Повреждения, вызванные сейсмической нагрузкой мостовых балок (рис. 9), можно разделить на два типа. Повреждения 1-го типа происходят на разных концах балок и вызваны ударами между соседними компонентами моста. Повреждения 2-го типа появляются в поперечном направлении нижней плиты, что отмечено красными кружками на рис. 9.

Как будет показано ниже, балка может упасть с несущих опор на соответствующую береговую или промежуточную опору из-за большого относительного смещения в поперечном направлении. Повреждения 2-го типа вызваны столкновением несущей опоры с балкой моста после ее падения с неопреновой несущей опоры/опор. Для лучшего рассмотрения механизма повреждения в качестве примера приведена динамика повреждения от соударения на левом конце правой балки. На рис. 10 показаны снимки повреждения 1-го типа. Сейсмическое повреждение от соударения (рис. 10, *a*) начинается в направлении  $+z$  по полке мостовой балки на 5,47 с из-за соударения между правым концом левой балки и левым концом правой балки в среднем зазоре. Область повреждения продолжает расти вследствие последующих ударов. Повреждения угла нижней плиты в направлении  $-z$ , полки в направлении  $-z$  и нижней плиты в направлении  $+z$  начинаются на 7,70, 8,63 и 13,47 секундах, соответственно (рис. 10, *б-г*). Кроме того, повреждение всегда происходит сначала на углах вследствие эксцентрического соударения из-за неизбежных крутильных реакций, вызванных пространственным изменением колебаний грунта.

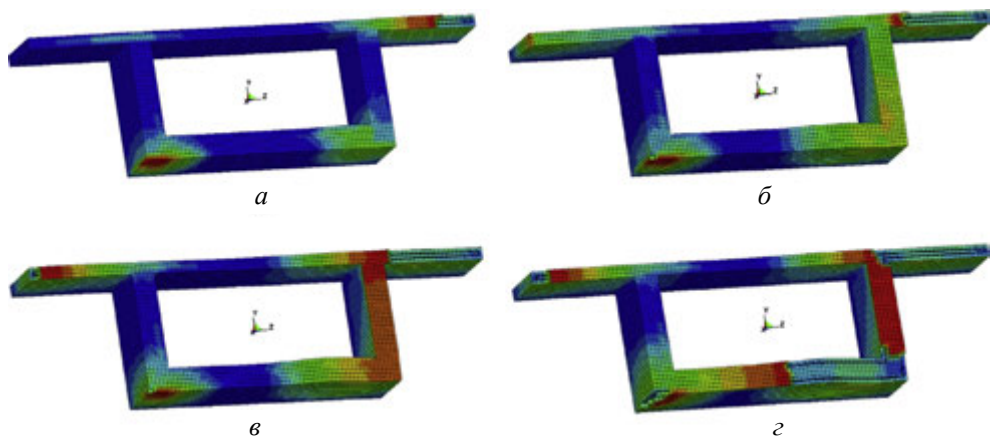


Рис. 10. Снимки повреждений 1-го типа на левом конце правой балки:  
 $a - t = 5,47$  с;  $б - t = 7,70$  с;  $в - t = 8,63$  с;  $г - t = 13,47$  с

На рис. 11 представлены снимки повреждений 2-го типа на левом конце правой балки. Как видно из рис. 11, *а*, балка упала с опоры на центральную опору на 9,42 с. Балка начинает контактировать с несущей опорой на 9,49 с вследствие поперечных вибраций, и повреждение происходит на 9,51 с за счет столкновений. Наконец, на 9,71 с несущая опора врзается в балку моста, как показано на рис. 11, *г*.

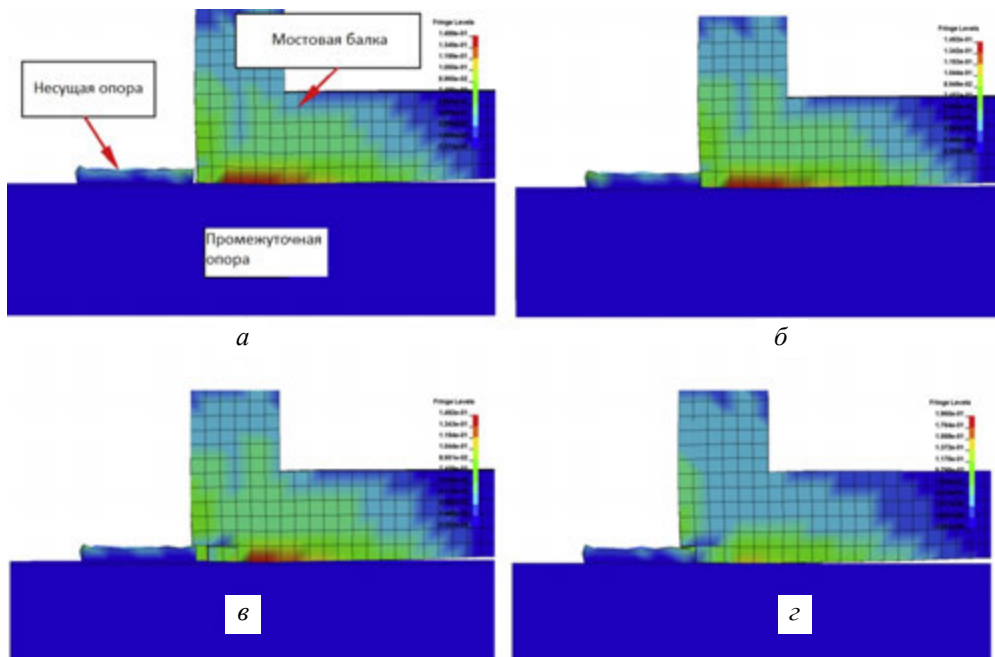


Рис. 11. Снимки повреждений 2-го типа на левом конце правой балки:  
 $a - t = 9,42$  с;  $б - t = 9,49$  с;  $в - t = 9,51$  с;  $г - t = 9,71$  с

После столкновения несущая опора и балка могут отделиться друг от друга, и снова могут возникнуть столкновения из-за сдвинутых по фазе движений между балкой моста и несущей опорой. Следует отметить, что модель вязкоупругого материала используется для моделирования неопределенных опор, а критерий повреждений не применяется к несущим опорам. Поэтому в данном исследовании моделируются только повреждения балки. Если применять критерий повреждения, может произойти повреждение несущих опор. Следует заметить, что повреждение 2-го типа происходит только тогда, когда балка моста падает с несущей опоры/опор. Если балка не падает, ущерб, показанный на рис. 9, б, не наблюдается (то же относится к рис. 14, б). Необходимо отметить, что боковые ограничители не учитываются в данной работе. Если вовлекаются боковые ограничители, то дальнейшие повреждения могут развиваться от их столкновений с мостовыми балками.

Из-за столкновений между соседними элементами конструкции моста в стержневой арматуре могут развиваться большие осевые напряжения, которые могут привести к пластической деформации соответствующих арматурных стержней. На рис. 12 показана пластическая деформация арматурных стержней левого конца правой балки. При изучении 1D возбуждения (рис. 12, а) можно заметить, что серьезная пластическая деформация происходит в углу арматурного каркаса (в красном кружке), а не там, где бетон подвергается разрушению (рис. 8, в). Это может быть вызвано концентрацией напряжения в районе угла, которое приводит к большему напряжению в стержневой арматуре, чем в арматуре в области разрушения бетона, вызванного фронтальным соударением поверхностей, как упоминалось выше. Большая пластическая деформация развивается также в углах (рис. 12, б) (красные и желтые кружки) за счет совместного влияния соударения и концентрации напряжений, порожденных 2D возбуждением грунта.

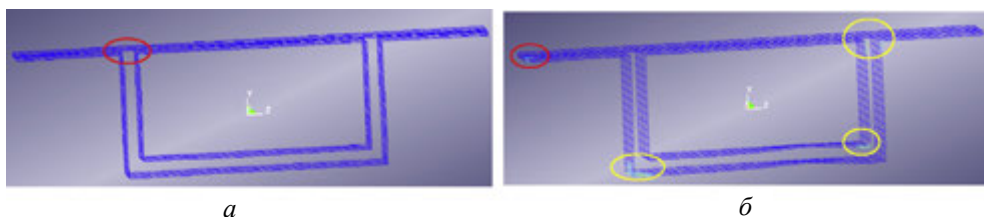


Рис. 12. Места пластической деформации в арматурных стержнях левого конца правой балки:  
а – 1D возбуждение; б – 2D возбуждение

На рис. 13 показана динамика развития осевого напряжения в одном из продольных стержней арматуры в местах, обозначенных красными кружками на рис. 12, в результате 1D и 2D возбуждений грунта. Как видно, большое осевое напряжение развивается в стержневой арматуре при соударении, пиковые значения достигают 590 и 655 МПа соответственно при 1D и 2D возбуждениях. Следует отметить, что в настоящей работе предел статической прочности стали

равен 660 МПа, а фактический предел прочности будет выше за счет скорости деформации. Максимальное осевое напряжение в арматуре меньше, чем предельное напряжение, что указывает на отсутствие повреждений арматуры при сейсмических нагрузках, рассматриваемых в данной работе.

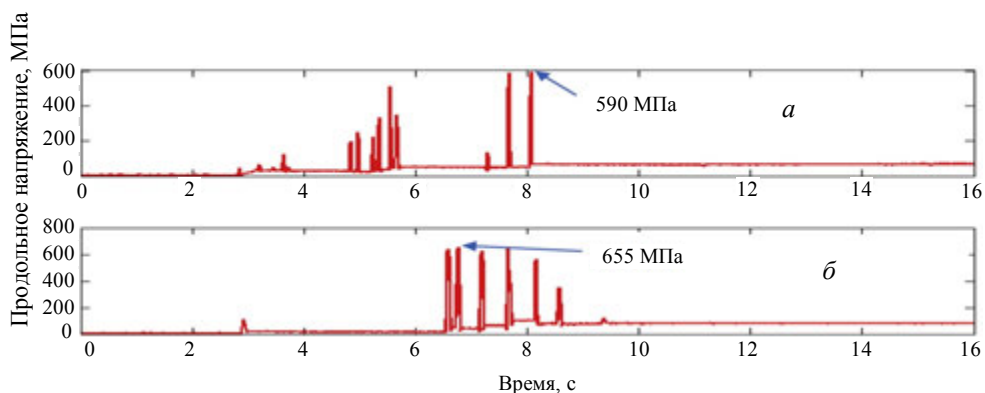


Рис. 13. Динамика осевого напряжения в одном из продольных стержней арматуры (в красных кружках рис. 12):  
*а* – 1D возбуждения; *б* – 2D возбуждения

Приведенные выше результаты показывают, что структурное поведение моста и повреждения из-за 1D и 2D возбуждений весьма различны. 2D возбуждения производят большее количество соударений и более серьезные разрушения бетона вследствие малой контактной поверхности, хотя пиковые ударные силы могут быть меньше. Так как при реальном землетрясении двунаправленные движения грунта всегда сосуществуют, важно учитывать 2D возбуждения грунта 3D конечно-элементной моделью, чтобы получить более точные прогнозы поведения моста.

Потенциалы смещения и сноса двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями также могут рассматриваться на основе 3D конечно-элементной модели.

На рис. 14 показаны реакции моста в поперечном направлении на различных зазорах. Как видно, относительные перемещения между балкой моста и соответствующей опорой в левом и правом зазорах достигают 0,81 и 0,78 м соответственно. В среднем зазоре относительное перемещение между правым концом левой балки и несущей опорой составляет 0,57 м, а между левым концом правой балки и промежуточной опорой – 0,75 м. При таком большом относительном смещении в поперечном направлении все балки моста, за исключением правого конца левой балки, упадут с неопределенных опор (рис. 14). После того, как мостовые балки упадут с несущих опор на береговые или промежуточные опоры, боковые столкновения несущих опор с балками моста могут привести к повреждениям 2-го типа. Численные результаты соответствуют многочисленным наблюдениям ранее произошедших землетрясений (см. рис. 1, *з* и *д*).

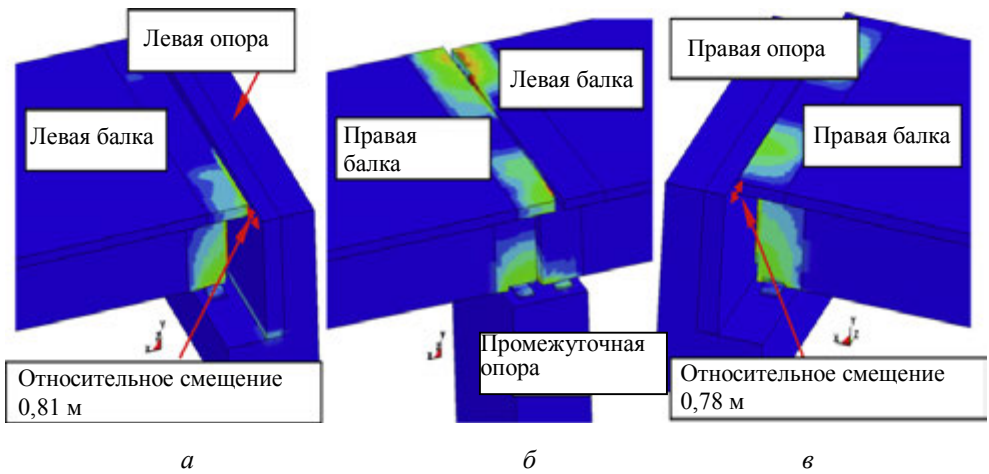


Рис. 14. Структурные реакции в поперечном направлении на различных зазорах при условиях грунта *SFS* и 2D возбуждениях:

*a* – левый зазор; *б* – средний зазор; *в* – правый зазор

Для изучения потенциала сноса на рис. 15 приведены продольные смещения двух различных узлов, где узел 18,317 располагается на нижней плите левого конца левой балки, а узел 474,540 – на верхней поверхности опоры. До землетрясения эти два узла совпадали друг с другом. Однако при землетрясении может наблюдаться относительное смещение.

На рис. 15, *a* показана динамика продольного смещения двух узлов, а на рис. 15, *б* – относительное смещение между этими двумя узлами. Максимальное относительное смещение в продольном направлении составляет 0,12 м, что меньше, чем длина подферменной площадки моста в левом зазоре (0,41 м в настоящем исследовании). В других зазорах относительные смещения тоже меньше, чем соответствующие им длины подферменной площадки. Таким образом, мостовые балки не будут смещены с несущих опор.

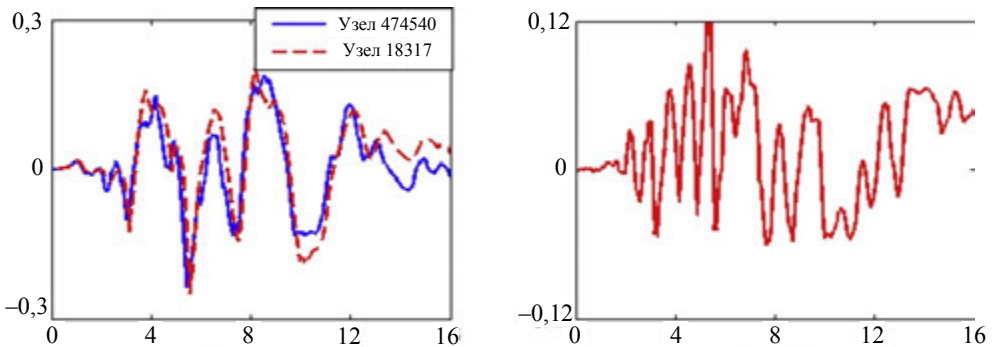


Рис. 15. Продольные смещения узлов:

*a* – динамика продольного смещения узлов 474,540 и 18,317; *б* – относительное смещение

### 3.2. Влияние условий грунта

Хотя длина мостовых пролетов (см. рис. 2) не очень велика, колебания грунта на различных опорах мостовой конструкции могут значительно варьироваться из-за местных условий. Для изучения влияния местного грунта рассматривается случай с грунтом 'FFF'. Результаты сравниваются с данными, полученными при рассмотрении условий грунта 'SFS', описанных в подразделе 3.1. Рассматриваются двунаправленные, слабокоррелируемые колебания грунта.

На рис. 16 показаны силы удара в разных зазорах. Очевидно, что более рыхлый грунт приводит к большим пиковым ударным силам. Это происходит потому, что рыхлый грунт ведет к большим смещениям при различных опорах мостовой конструкции [23], что, в свою очередь, дает толчок к относительному смещению между смежными элементами моста и делает соударения более серьезными, чем на твердом грунте. В условиях твердого грунта соседние элементы сталкиваются 8, 14 и 12 раз на левом, среднем и правом зазорах соответственно. Когда мост расположен на рыхлом грунте, элементы сталкиваются 11, 27 и 17 раз, как описано в подразд. 3.1. Меньшее количество соударений в условиях твердого грунта можно объяснить его меньшими входными перемещениями у различных опор.

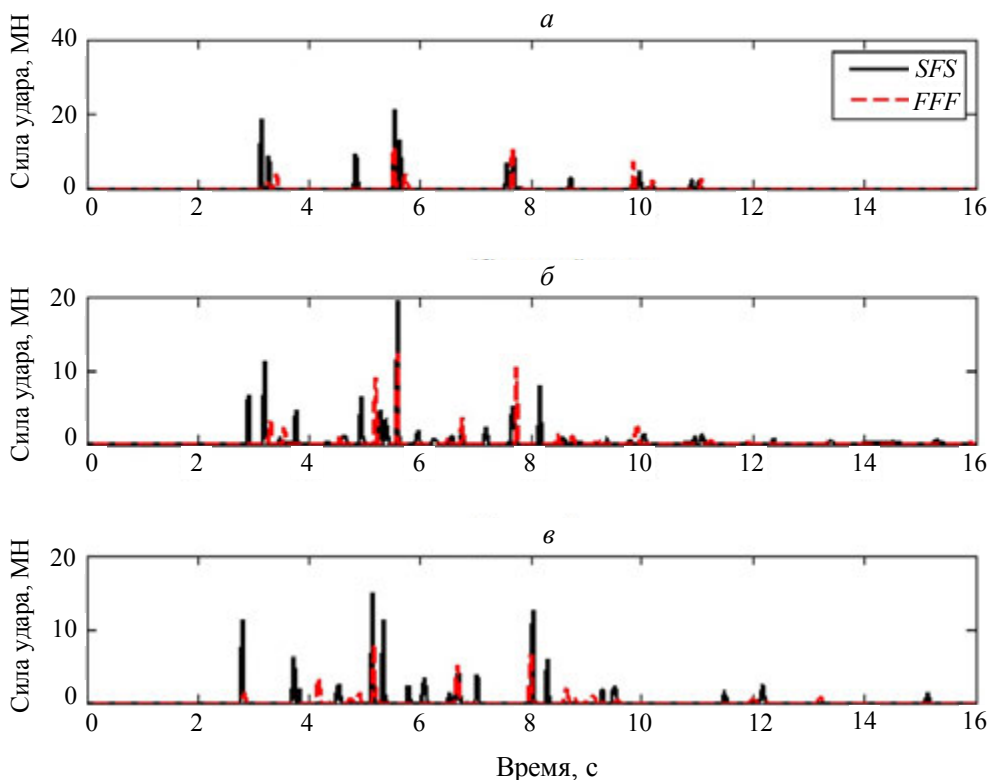


Рис. 16. Влияние местных условий грунта на ударные силы:  
а – левый зазор; б – средний зазор; в – правый зазор

На рис. 17 показано повреждение от соударения балок при условиях грунта 'FFF'. Мостовые балки страдают незначительно или вообще не повреждаются по сравнению с условиями грунта 'SFS' (рис. 9). Кроме того, наблюдается повреждение только 1-го типа. Однако повреждение 2-го типа, которое происходит в боковом направлении нижней плиты, не наблюдается потому, что в условиях твердого грунта, как будет показано ниже, балки моста не упадут с опор на береговые или центральные опоры и не произойдет столкновения между балками и соответствующими неопределенными опорами. Интересно, что наблюдается незначительное повреждение также в верхнем углу левой опоры (рис. 18). Следует отметить, что на рыхлом грунте не наблюдается повреждение береговых опор, хотя соседние балки моста страдают от серьезных повреждений (рис. 9, а).

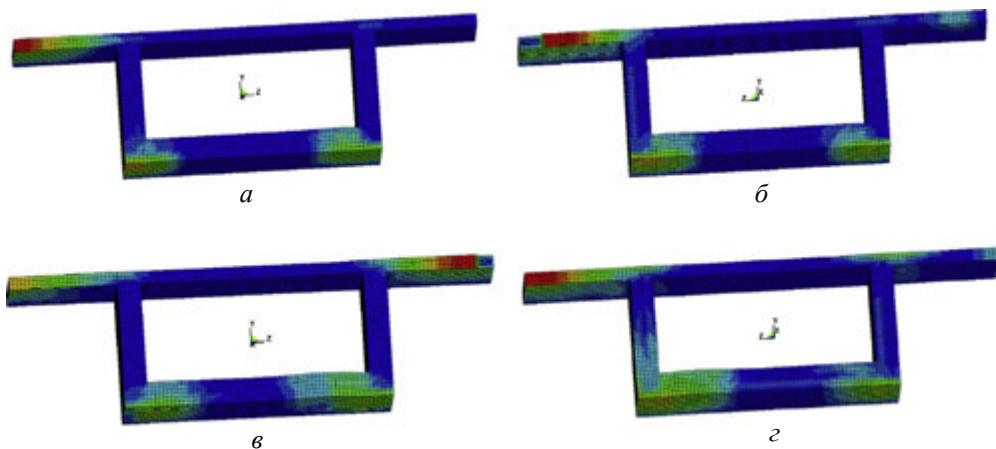


Рис. 17. Повреждения от соударения балок моста при условии грунта *FFF*:  
*а* – левый конец левой балки; *б* – правый конец левой балки; *в* – левый конец правой балки; *г* – правый конец правой балки

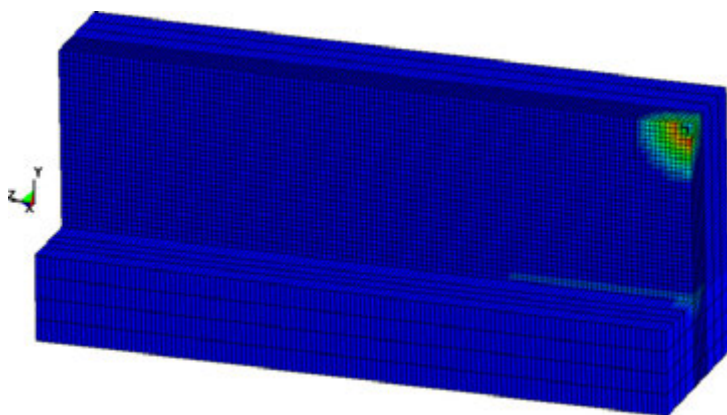


Рис. 18. Повреждение от соударения на левой береговой опоре в условиях грунта *FFF*

На рис. 19 показаны относительные смещения в поперечном направлении на различных зазорах в условиях грунта 'FFF' и 2D возбуждении.

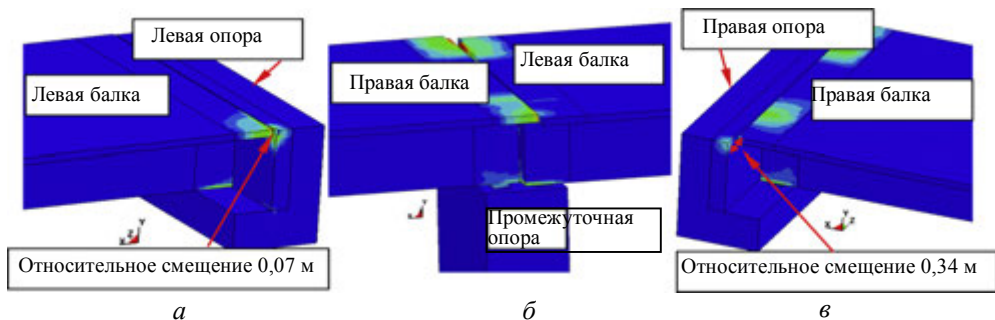


Рис. 19. Структурные реакции в поперечном направлении на различных зазорах в условиях грунта *FFF* и 2D возбуждениях:

*а* – левый зазор; *б* – средний зазор; *в* – правый зазор

Относительные перемещения между различными концами и соответствующими береговыми или промежуточной опорами составляют 0,07, 0,22, 0,60 и 0,34 м соответственно. Они намного меньше, чем при условиях грунта 'SFS'. При этих относительно малых смещениях в поперечном направлении балки моста не упадут с опор, и повреждение 2-го типа не произойдет. Для изучения потенциала сноса изучалось также относительное смещение в продольном направлении. Установлено, что максимальные значения равны 0,10, 0,12, 0,10 и 0,08 м соответственно. Они меньше, чем длина подферменной площадки моста, балки не будут смещены с опор.

### Заключение

В настоящей работе построена детальная 3D модель конечных элементов двухпролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями, находящегося на площадке каньона. В модель заложены такие элементы моста, как балки, береговые опоры, промежуточная опора, продольная стержневая арматура и хомуты. Рассмотрено поведение нелинейного материала, включая скорость деформации бетона и стальной арматуры. С помощью программы расчёта LS-DYNA методом конечных элементов подробно исследованы ударные реакции между соседними компонентами конструкции при пространственных изменениях колебаний грунта. Данная работа включает в себя три аспекта: 1) созданная 3D модель не нуждается в предположении мест соударения и поэтому легко моделировать соударения по точкам, взаимным поверхностям и эксцентричным соударениям, связанным с 3D реакциями моста; 2) соударение, вызванное повреждением, может быть легко установлено с помощью предложенного метода. Ударные реакции мостовых конструкций можно предсказать с большей долей вероятности, учитывая значительное количество рассеиваемой энергии при повреждениях; 3) рассмотрены потенциалы смещения и схода мостовых настилов во время землетрясения. Ни

в одном исследовании ранее не рассматривались эти три аспекта. На основе численных результатов сделаны следующие выводы:

1. Поведение моста и повреждения от 1D и 2D возбуждений грунта очень разнятся. Традиционный анализ поведения моста с учетом только 1D возбуждений и 1D реакций моста может привести к неправильным предсказаниям реакции соударения и недооценке повреждений от соударения.

2. Боковые и крутильные реакции моста провоцируют большее количество соударений, но меньшие ударные силы вследствие малого влияния инерционного сопротивления массы моста ударам. Тем не менее, они могут вызвать более серьезные повреждения конструкции из-за меньшей контактной поверхности.

3. При сейсмических соударениях могут развиваться два типа повреждения: 1-й тип повреждения вызван прямым соударением между соседними компонентами моста; 2-й тип вызван столкновениями балок моста и опор после падения балок моста с опор из-за большого относительного смещения в поперечном направлении.

4. В местах соударения обычно происходит разрушение бетона. В местах концентрации напряжения обычно появляется огромное напряжение арматурных стержней, не обязательно в местах соударения с поврежденным бетоном.

5. Местные условия грунта существенно влияют на поведение конструкции моста. Чем мягче грунт, тем серьезнее повреждения. Следует отметить, что характер и масштаб ущерба каждого моста во время землетрясения могут изменяться в зависимости от характеристик движения грунта в определенном месте и конструктивных особенностей моста, поэтому трудно дать общую характеристику реакциям и повреждениям конкретному мосту и необходимы подробные численные или экспериментальные исследования, чтобы реалистично смоделировать поведение и повреждение конструкции моста в условиях определенного землетрясения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Moehle, J.P., Eberhard, M.O.* Earthquake damage to bridges [Повреждения мостов, вызванные землетрясением]. In: Chen WF, Duan L, editors. Bridge engineering handbook. Boca Raton: CRC Press; 2000 [chapter 34].
2. *Uzarski, J., Arnold, C.,* editors. Chi-Chi, Taiwan, earthquake of September 21, 1999 reconnaissance report [Чи-Чи, Тайвань, землетрясение 21 сентября 1999, доклад по результатам обследования]. CA: Earthquake Engineering Research Institute; 2001.
3. *Dimitrakopoulos, E.G.* Seismic response analysis of skew bridges with pounding deck-abutment joints [Анализ сейсмической реакции косых мостов с соударением узла «настил–опора»]. *Eng Struct* 2011; 33(3): 813–26.
4. *Malhotra, P.K.* Dynamics of seismic pounding at expansion joints of concrete bridges [Динамика сейсмических соударений в компенсационных соединениях бетонных мостов]. *J Eng Mech* 1998; 124(7): 794–802.
5. *Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y.* Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes [Соударение наземных частей отдельного эстакадного моста во время землетрясения]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 1998; 27(5): 487–502.

6. *Ruangrassamee, A., Kawashima, K.* Relative displacement response spectra with pounding effect [Спектры реакции относительного смещения с эффектом соударения]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2001;30(10):1511–38.
7. *DesRoches, R., Muthukumar, S.* Effect of pounding and restrainers on seismic response of multi-frame bridges [Эффект соударения и замедлители сейсмической реакции в многопролетных мостах]. *J Struct Eng* 2002;128(7):860–9.
8. *Chouw, N., Hao, H.* Study of SSI and non-uniform ground motion effects on pounding between bridge girders [Исследование взаимодействия между грунтом и конструкцией и влияние неравномерных колебаний грунта на соударение мостовых балок]. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2005; 23(7– 10): 717–28.
9. *Chouw, N., Hao, H.* Significance of SSI and non-uniform near-fault ground motions in bridge response I: effect on response with conventional expansion joint [Значение взаимодействия грунта и конструкции с неравномерными, почти разрушительными колебаниями грунта при поведении моста I: влияние на реакцию традиционного компенсационного соединения]. *J Eng Struct* 2008; 30(1): 141–53.
10. *Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y.* Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes [Снижение эффекта соударения в эстакадных мостах во время землетрясения]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2000; 29(2): 195–212.
11. *Chouw, N., Hao, H., Su, H.* Multi-sided pounding response of bridge structures with non-linear bearings to spatially varying ground excitation [Многосторонняя реакция соударения мостовых конструкций с нелинейными несущими опорами на пространственные возбуждения грунта]. *Adv Struct Eng* 2006; 9(1): 55–66.
12. *Raheem, S.E.A.* Pounding mitigation and unseating prevention at expansion joints of isolated multi-span bridges [Смягчение соударения и предотвращение схода настила у компенсационных соединений отдельных многопролетных мостов]. *Eng Struct* 2009; 31(10): 2345–56.
13. *Zanardo, G., Hao, H., Modena, C.* Seismic response of multi-span simply supported bridges to spatially varying earthquake ground motion [Сейсмическая реакция многопролетного моста со свободно опертыми пролетными строениями на пространственное движение грунта при землетрясении]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2002; 31(6): 1325–45.
14. *Julian, F.D.R., Hayashikawa, T., Obata, T.* Seismic performance of isolated curved steel viaducts equipped with deck unseating prevention cable restrainers [Сейсмические характеристики отдельных изогнутых путепроводов, оснащенных ограничительными железными тросами для предотвращения сноса подферменной площадки]. *J Constr Steel Res* 2006; 63: 237–53.
15. *Zhu, P., Abe, M., Fujino, Y.* Modelling three-dimensional non-linear seismic performance of elevated bridges with emphasis on pounding of girders [Трехмерное моделирование нелинейного сейсмического поведения эстакадных мостов с ориентацией на соударение балок]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2002; 31: 1891–913.
16. *Guo, A., Li, Z., Li, H.* Point-to-surface pounding of highway bridges with deck rotation subjected to bi-directional earthquake excitations [Соударение системы «точка–поверхность» автомобильных мостов с вращением настила, подверженного двунаправленным возбуждениям при землетрясении]. *J Earthquake Eng* 2011; 15(2): 274–302.
17. *Bi, K., Hao, H., Zhang, C.* Analysis of coupled axial–torsional pounding response of adjacent bridge structures [Анализ комбинированной ударной осевой и крутильной реакции соседних мостовых конструкций]. In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> international symposium on structural engineering*, Guangzhou, China; 2010. p. 1612–8.
18. LS-DYNA. LS-DYNA user manual [Инструкция для пользователей пакета LS-DYNA]. Livermore Software Technology Corporation; 2007.
19. *Bi, K., Hao, H.* Pounding response of adjacent bridge structures on a canyon site to spatially varying ground motions [Ударная реакция соседних конструкций моста на площадке каньона в условиях пространственных колебаний грунта]. In: *Australia earthquake engineering society 2010 conference*, Perth, Australia; 2010 [paper no. 2].
20. *Der Kiureghian, A.* A coherency model for spatially varying ground motions [Логическая модель для пространственных колебаний грунта]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 1996; 25(1): 99–111.

21. Bi, K., Hao, H. Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions [Влияние неправильной топографии и выборочных свойств грунта на потерю когерентности при пространственных сейсмических движениях грунта]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2011; 40(9): 1045–61.
22. ANSYS. ANSYS user's manual revision 12.1 [ANSYS. Версия 12.1 инструкции для пользователей пакета ANSYS]. ANSYS Inc.; 2009.
23. Bi, K., Hao, H. Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions [Моделирование и имитация пространственных сейсмических движений грунта на площадках с переменными условиями]. *Probab Eng Mech* 2012; 29: 92–104.
24. Bi, K., Hao, H., Chow, N. Influence of ground motion spatial variation, site condition and SSI on the required separation distances of bridge structures to avoid seismic pounding [Влияние пространственных движений грунта, условий площадки и взаимодействия «грунт–конструкция» на необходимое пространственное разнесение мостовых конструкций во избежание сейсмических соударений]. *Earthquake Eng Struct Dyn* 2011; 40(9): 1027–43.
25. Jankowski, R. Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View hospital [Нелинейный конечно-элементный анализ сейсмических соударений между главным строением и лестничной площадкой госпиталя Olive View]. *Eng Struct* 2009; 31(8): 1851–64.
26. Jankowski, R. Non-linear FEM analysis of pounding-involved response of buildings under non-uniform earthquake excitation [Нелинейный конечно-элементный анализ ударной реакции зданий при неравномерных сейсмических возбуждениях]. *Eng Struct* 2012; 37: 99–105.
27. Tang, E.K.C., Hao, H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads. Part I: model development and response calculations [Численное моделирование реакции канатного висячего моста при взрывных нагрузках. Часть 1: разработка модели и расчет реакции]. *Eng Struct* 2010; 32(10): 3180–92.
28. Li, J., Hao, H. A two-step numerical method for efficient analysis of structural response to blast load [Двухшаговый метод эффективного анализа поведения конструкции при взрывной нагрузке]. *Int J Protect Struct* 2011; 2(1): 103–26.
29. Wekezer, J., Taft, E., Kwasniewski, L., Earle, S. Investigation of impact factors for FODT bridges [Исследование коэффициента динамического воздействия для испытания мостов усовершенствованного образца в процессе разработки]. FDOT Structures research laboratory final report. Tallahassee, USA; 2010.
30. Comite Euro-International du Beton. Concrete structures under impact and impulsive loading [Бетонные конструкции в условиях ударного и импульсного нагружения]. СЕВ Bulletin 187. Switzerland: Federal Institute of Technology Lausanne; 1990.
31. Malvar, L.J., Ross, C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension [Изучение влияния скорости деформации для напряженного бетона]. *Am Concr Inst Mater J* 1998; 95(6): 735–9.
32. Malvar, L.J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars [Изучение статических и динамических свойств стальных стержней арматуры]. *Concr Inst Mater J* 1998; 95(6): 609–16.
33. Hao, H., Oliveira, C.S., Penzien, J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data [Многопозиционная обработка движения грунта и моделирование на базе устройства SMART-1 для хранения массива данных]. *J Nucl Eng Des* 1989; 111(3): 293–310.
34. Tajimi, H. A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake [Статистический метод определения максимального значения строительного сооружения во время землетрясения]. In: *Proceedings of 2<sup>nd</sup> world conference on earthquake engineering*, Tokyo; 1960. p. 781–96.
35. Wolf, J.P. Dynamic soil–structure interaction [Динамическое взаимодействие между грунтом и конструкцией]. New Jersey: Englewood Cliffs; 1985.
36. Der Kiureghian, A. Structural response to stationary excitation [Реакция конструкции на стационарное возбуждение]. *J Eng Mech Div* 1980; 106(6): 1195–213.
37. Sobczyk, K. Stochastic wave propagation [Стохастическое распространение волн]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 1991.

## ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА

*ПРОКОФЬЕВА ГАЛИНА ИВАНОВНА, доцент,*

*galinaivanovnapr@mail.ru*

*ГУСАКОВА НАТАЛЬЯ ВАСИЛЬЕВНА, ст. преподаватель,*

*gusakovanata@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАЛОЭТАЖНОЙ ЖИЛОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

В статье дается обоснование применения системы отопления с использованием низкопотенциальных источников тепла. Отопление детского дошкольного учреждения производилось при помощи тепловых насосов, позволяющих получить до 85 % тепловой энергии бесплатно.

Проводилось сравнение общего годового расхода тепловой и электрической энергии, расходуемой на отопление и горячее водоснабжение при центральном теплоснабжении и использовании глубинного тепла земли, на примере детского дошкольного учреждения. В качестве базового детского сада был принят ранее запроектированный детский сад, отвечающий требованиям энергоэффективности с точки зрения архитектурно-строительных решений с центральной системой отопления и водоснабжения.

Применение геотермальных источников позволит сэкономить 429 МВт энергии и получить годовой экономический эффект за счет экономии на коммунальных платежах 351,112 тыс. руб.

**Ключевые слова:** технологии энергосбережения; энергосбережение; тепло-снабжение; малоэтажная жилая застройка.

*GALINA I. PROKOF'EVA, A/Professor,*

*galinaivanovnapr@mail.ru*

*NATAL'JA V. GUSAKOVA, Senior Lecturer,*

*gusakovanata@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## ECONOMIC FEASIBILITY FOR ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN LOW-RISE AND SOCIAL INFRASTRUCTURE CONSTRUCTION

This article describes heating systems using low grade heat sources. Heat pump units were used for heating preschool which allow saving up to 85 % of heat energy. A comparison was made for the annual heat and electric power consumption in a previously designed kindergarten which meets the requirements of energy efficiency with central heating services and water facilities. As a result, the difference between the annual heat and electric power consumption provided by centralized services and that one provided by the deep heat of the earth would save power up to 429 MWt and utility payment of 351 112 rubles.

**Keywords:** energy saving technology; energy; heat; low-rise housing construction.

Решение проблемы энергоэффективности – один из приоритетов национальной политики России. Ресурсы невозобновляемых источников энергии заканчиваются, поэтому многие ученые осуществляют поиск нетрадиционных возобновляемых источников энергии [1].

Как показал мировой опыт, наиболее эффективным направлением в технологии использования нетрадиционных источников энергии является применение теплонасосных систем теплоснабжения, использующих в качестве источника тепла грунт поверхностных слоев земли. При этом выделяется два типа тепловой энергии: высокопотенциальная и низкопотенциальная. Применение высокопотенциальной тепловой энергии, обусловленное использованием гидротермальных ресурсов, ограничено в России географически.

Использование низкопотенциального тепла с применением тепловых насосов возможно в России практически повсеместно. В настоящее время это одно из наиболее динамично развивающихся направлений применения нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

На территории Томской области актуальным является использование низкопотенциальной энергии земли, где в качестве главного энергоресурса выступает земельный участок.

Ввиду суровых климатических условий в нашем регионе и, как следствие, значительных затрат на отопление использование нетрадиционных возобновляемых источников сократит затраты на централизованное теплоснабжение и позволит сэкономить средства для других направлений развития Томской области. Для реализации энергосберегающей политики в нашем регионе создана региональная нормативно-правовая база по энергосбережению [2–5].

Целью исследования является расчет экономической эффективности использования геотермальных источников с помощью тепловых насосов. Экономия энергии оценивается на примере детского дошкольного учреждения.

В качестве базового объекта принят ранее запроектированный детский сад, который в соответствии с регламентом нормативной базы отвечает требованиям энергоэффективности с точки зрения использования объемно-планировочных и конструктивных решений и по своим энергосберегающим показателям.

С целью повышения его энергоэффективности были запроектированы:

- ограждающие конструкции с фасадной теплосберегающей системой «Полиалпан»;

- система отопления теплых полов;
- устройство механической системы вентиляции с рекуперацией тепла удаляемого воздуха;

- теплонасосные установки для системы отопления и горячего водоснабжения, использующие глубинное тепло земли.

Для утепления фасада использована теплосберегающая система «Полиалпан».

Фасадная облицовочная панель «Полиалпан» (рис. 1) представляет собой трехслойную конструкцию с надежными адгезионными связями:

- лицевая поверхность – высококачественный алюминиевый лист толщиной 0,5 мм, грунтованный, покрытый цветным лаком с широкой цветовой гаммой и имеющий чеканную фактуру под штукатурку (чистую, декоративную) или дерево;

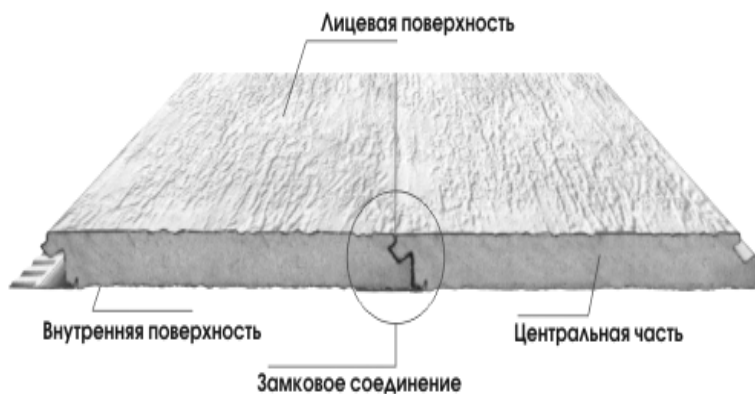


Рис. 1. Фасадная облицовочная панель

- центральная часть – слой пенополиуретана толщиной 25 мм и средней плотностью  $35 \text{ кг/м}^3$ , который обладает высокими теплоизоляционными параметрами (коэффициент теплопроводности  $0,026 \text{ Вт/м} \cdot \text{с}$ );

- внутренняя поверхность – легированная алюминиевая фольга толщиной  $0,05 \text{ мм}$ , выполняющая пароизоляционные и теплоотражающие функции [6].

Во всех помещениях предусмотрены теплые водяные полы из труб PERT с антидиффузной защитой. Такое отопление имеет ряд преимуществ, которые отличают водяной тёплый пол от радиаторной системы отопления (рис. 2).

Его главным качеством является равномерное распределение тепла по всему помещению. В радиаторной системе холодный воздух опускается вниз, а тёплый поднимается вверх. Преимуществом данной системы отопления является экономия потребления электроэнергии. В дальнейшем тёплый пол не требует никаких расходов на обслуживание [7].

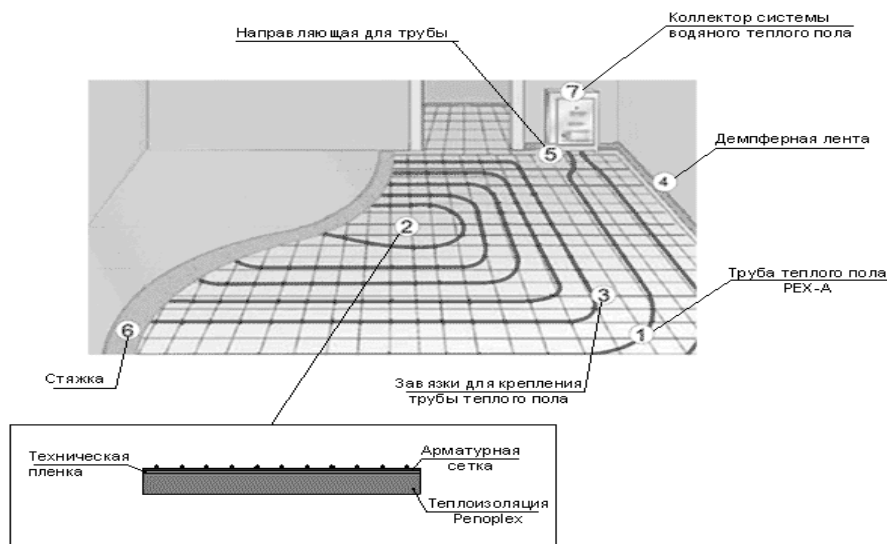


Рис. 2. Устройство водяного теплого пола

Для улучшения качества микроклимата в помещениях спален, игровых и зала спортивных и музыкальных занятий запроектирована система вентиляции с механическим побуждением с подогревом приточного воздуха до температуры 9–22 °С за счет теплоты удаляемого воздуха. Для утилизации тепла удаляемого воздуха предусматривается применение специальных приточно-вытяжных установок.

Для отопления предусмотрены тепловые насосы. Они представляют собой законченное изделие, готовую теплоснабжающую установку. Внутри нее находятся 2 бойлера емкостью 200 л, насос внешнего контура, собирающий тепло окружающей среды, насос системы отопления и автоматика высокого уровня регулирования.

Нагрев теплоносителя для системы отопления и ГВС детского сада осуществляется 2 теплонасосами суммарной мощностью 126 кВт.

Принцип действия теплового насоса представлен на рис. 3 [8].

Охлажденный теплоноситель, проходя по трубопроводу, уложенному в землю, нагревается на несколько градусов. Внутри теплового насоса теплоноситель, проходя через теплообменник, называемый испарителем, отдает собранное из окружающей среды тепло во внутренний контур теплового насоса. Внутренний контур теплового насоса заполнен хладагентом. Он, имея очень низкую температуру кипения, проходя через испаритель, превращается из жидкого состояния в газообразное. Из испарителя газообразный хладагент попадает в компрессор, где он сжимается до высокого давления и высокой температуры. Далее горячий газ поступает во второй теплообменник, конденсатор. В конденсаторе происходит теплообмен между горячим газом и теплоносителем из обратного трубопровода системы отопления дома. Хладагент отдает свое тепло в систему отопления, охлаждается и снова переходит в жид-

кое состояние, а нагретый теплоноситель системы отопления поступает к отопительным приборам.

В данной статье дается анализ энергоэффективности социального объекта с использованием геотермальных источников для отопления и горячего водоснабжения с помощью тепловых насосов.



Рис. 3. Принцип действия теплового насоса

Сравнение стоимости тепловой энергии от различных источников приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение стоимости тепловой энергии от различных источников**

№ п/п	Показатели	Значение
1	Стоимость 1 кВт электроэнергии, руб.	2,28
2	Стоимость 1 кВт тепловой энергии, получаемой от теплового насоса, руб.	0,57
3	Стоимость 1 кВт тепловой энергии, по тарифу ОАО «ТГК-11», руб.	2,46

«Выведенный тариф», по которому ОАО «ТГК-11» продает тепло, в 4,3 раза превышает стоимость тепла от теплового насоса. Таким образом,

видно, что использование тепловых насосов выгодно с точки зрения коммунальных затрат. Использование локальной системы снабжения позволяет за счет экономии стоимости единицы тепловой энергии снизить затраты на отопление.

Все результаты по расчету годовой тепловой и электрической энергии в базовом и проектируемом варианте детского дошкольного учреждения изложены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты сравнения проектов базового и энергоэффективного детского сада (отопление и горячее водоснабжение)**

№ п/п	Показатели	Варианты	
		Базовый	Энергоэффективный
1	Общий годовой расход тепловой энергии на отопление и ГВС на ГРЭС-2, кВт/год	485 071	6 824
	В том числе:		
	на отопление при централизованном теплоснабжении	477 866	6 824
	на горячее водоснабжение	7 205	–
2	Общий годовой расход тепловой энергии на отопление с теплонасосной установкой (0,48 – коэффициент усреднения), кВт/год	–	163 215
3	Общий годовой расход тепловой энергии на горячее водоснабжение с теплонасосной установкой, кВт/год	–	8 059
4	Общий годовой расход электрической энергии, кВт/год	1 440	46 503
	В том числе:		
	на тепловые насосы:		
	отопление	–	44 487
	ГВС	–	42 394
	на водоснабжение и канализацию (догрев в электрических водонагревателях):	1 440	2 016
нагрев в период ремонтных работ (10 рабочих дней); догрев до температуры 65 °С	–	–	
		–	2 016
5	Общегодовые расходы на эксплуатацию, тыс. руб./год	463,6	112,5
	В том числе:		
	электроэнергии при цене 2,28 руб./кВт	3,2	106
	тепловой энергии при цене 0,949 руб./кВт	460,3	6,5
6	Экономический эффект, тыс. руб.	–	351,1

На основе представленных расчетов построим график тепловой электрической нагрузки рассматриваемых вариантов (рис. 4).

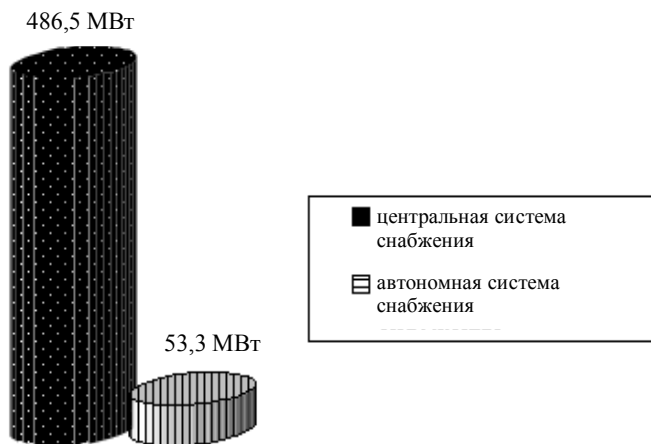


Рис. 4. Общая годовая нагрузка системы централизованного и автономного теплоснабжения

Как видно из рис. 4, общая годовая потребляемая энергия, включая тепловую и электрическую, при использовании геотермальных источников значительно меньше, чем используемая для этих целей энергия централизованной системы отопления.

Причем в структуре общей годовой нагрузки в первом случае 99 % занимает тепловая энергия, а во втором 87 % – электрическая энергия (рис. 5).

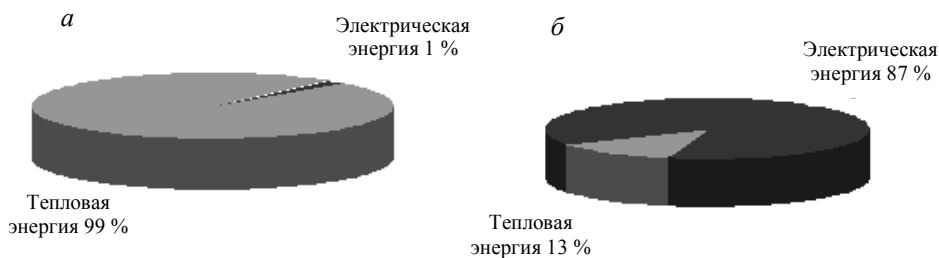


Рис. 5. Структура годовой потребляемой энергии:  
 а – базовый детский сад; б – энергоэффективный детский сад

Рассчитав расходы на эксплуатацию тепловой и электрической энергии, определили, что совокупные затраты составляют 463,6 тыс. руб. и 112,5 тыс. руб. соответственно. Таким образом, использование тепловых установок позволит ежегодно экономить расход тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение на 433,2 МВт (см. рис. 4). Годовой эффект за счет экономии на коммунальных платежах за отопление и горячее водоснабжение составит 351,1 тыс. руб (рис. 6).

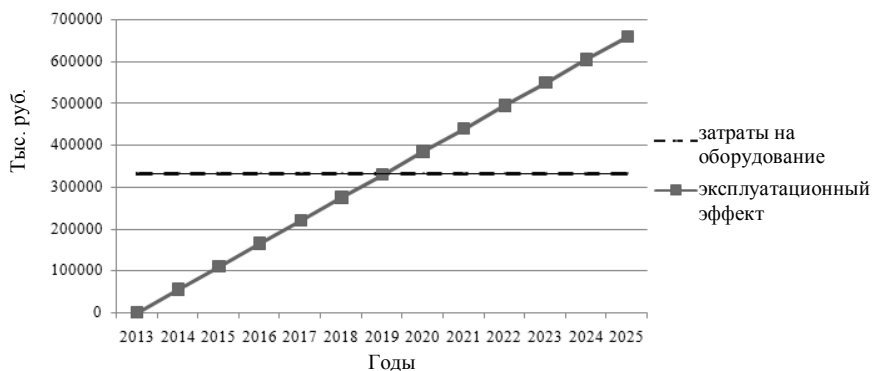


Рис. 6. Срок окупаемости тепловых установок

Таким образом, рассчитав срок окупаемости оборудования, отметим, что он составит 6 лет. При этом расчетный срок службы оборудования – порядка 30 лет, а эксплуатации грунтового зонда – более 100 лет. Дополнительная привлекательность тепловых насосов состоит в их длительном сроке службы и очень высокой эксплуатационной надежности, т. к. тепловые агрегаты являются взрывозащищенными и пожаробезопасными. Этот метод отопления экологически чистый, следовательно, отсутствуют аллергенно-опасные выбросы в помещение. Поэтому тепловой насос представляет эффективную замену централизованному теплоснабжению.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Васильев, Г.П.* Использование низкопотенциальной энергии земли в теплонасосных системах / Г.П. Васильев, Н.В. Шилкин. – Условия доступа : [http://www.insolar.ru/lib\\_15.php](http://www.insolar.ru/lib_15.php).
2. *Закон Томской области «Об основах энергосбережения на территории Томской области»* (в ред. законов Томской области от 04.05.2001 N 47-ОЗ, от 06.07.2007 N 121-ОЗ).
3. *Распоряжение администрации Томской области от 13 октября 2010 г. № 861-ра «О реализации Федерального закона от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».*
4. *Распоряжение губернатора Томской области от 2 сентября 2010 г. № 260-р «О распределении полномочий в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности между исполнительными органами государственной власти Томской области и структурными подразделениями администрации Томской области».*
5. *Закон Томской области «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности на территории Томской области» от 19 октября 2010 года № 238-ОЗ.*
6. *Завод «Полиалпан».* – Условия доступа : <http://polyalpan-rus.com/11/>.
7. *Теплотехника.* – Условия доступа : <http://www.teplo3000.spb.ru/tp.asp>.
8. *ООО «Теплосервис».* – Условия доступа : <http://www.teplonew.ru/stati5.html>.

## REFERENCES

1. *Vasil'ev, G.P., Shilkin, N.V.* Ispol'zovanie nizkopotentsial'noi energii zemli v teplonasosnykh sistemakh [Use of low grade earth energy in heat pump systems]. Access conditions: [http://www.insolar.ru/lib\\_15.php](http://www.insolar.ru/lib_15.php).
2. *The Tomsk region law* 'Basic principles of energy saving in the Tomsk region' (04.05.2001 N 47-OZ; 06.07.2007 N 121-OZ). (rus)
3. *Decree of the Tomsk region Administration* of 13 Oct. 2010 N 861-ra «O realizacii Federal'nogo Zakona ot 23 nojabrja 2009 goda № 261-FZ «Ob jenergosberezenii i o povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii». (rus)
4. *Decree of the Tomsk region Governor* of 2 Sept. 2010 N 260-r «O raspredelenii polnomochij v oblasti jenergosberezenija i povyshenija jenergeticheskoj jeffektivnosti mezhdu ispolnitel'nymi organami gosudarstvennoj vlasti Tomskoj oblasti i strukturnymi podrazdelenijami Administracii Tomskoj oblasti». (rus)
5. *The Tomsk region law* 'Energy saving and improvement of energy efficiency in the Tomsk region' (19 Oct. 2010 N 238-OZ). (rus)
6. *Zavod «Polialpan»*. Access conditions: <http://polyalpan-rus.com/11/>.
7. *Teplotehnika*. Access conditions : <http://www.teplo3000.spb.ru/tp.asp>.
8. *ООО «Teploservis»*. Access conditions: <http://www.teplonew.ru/stati5.html>.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 624.132: 69.002.5

*НЕГОДИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ, ст. преподаватель,  
semerka.82@mail.ru*

*КРАВЧЕНКО СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
kravchenkosm.1951@mail.ru*

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук,  
osip1809@rambler.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ВЛИЯНИЕ ГРАВИЙНО-ГАЛЕЧНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ИХ РЕЗАНИЯ ОСТРЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Для оценки повышения сложности разработки мерзлых грунтов с гравийно-галечными включениями используется отношение среднемаксимальных усилий резания мерзлого грунта с включениями и без них. Разработаны регрессионные модели для описания экспериментальных зависимостей относительной сложности разработки мерзлых грунтов с включениями от характеристик грунтов (температуры, влажности, доли и размера включений) и параметров процесса резания (ширины резца, толщины стружки, угла резания).

**Ключевые слова:** мерзлый грунт; гравийно-галечные включения; процесс резания; резец; усилие резания; коэффициент энергоемкости; регрессии.

*ALEKSANDR V. NEGODIN, Senior Lecturer,  
semerka.82@mail.ru*

*SERGEI M. KRAVCHENKO, PhD, A/Professor,  
kravchenkosm.1951@mail.ru*

*SERGEI P. OSIPOV, PhD, A/Professor,  
osip1809@rambler.ru*

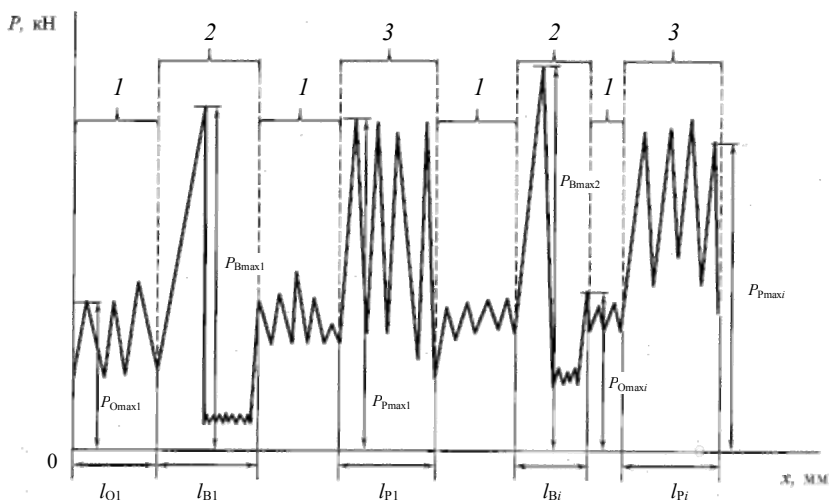
*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## THE IMPACT OF GRAVEL AND BOULDER INCLUSIONS ON ICE SOIL CUTTING PARAMETERS

The paper presents the estimation of complicated excavation of ice soil with gravel and boulder inclusions. The cutting force ratio of soil with inclusions to soil without inclusions was used for this estimation. Regression models were designed to describe experimental dependence between ice soil properties complexity (temperature, moisture, fraction, and size of inclusions) and cutting parameters (cutting tool width, chip thickness, cutting angle).

**Keywords:** ice soil; gravel and boulder inclusion; cutting; cutting tool; cutting force; energy intensity; regression.

Одним из параметров, на основе которых проектируются рабочие органы землеройных машин для разработки мерзлых грунтов, является усилие резания. Без учета значений усилия резания невозможно оценить производительность землеройных машин, корректно подобрать режущий инструмент. В работах [1–3] приводятся формулы для вычисления усилия резания, коэффициента энергоемкости процесса резания применительно к разработке различных видов однородных мерзлых грунтов. Наличие гравийно-галечных включений (далее включений) в грунтах приводит к изменению характеристик процесса резания – среднему максимальному усилию резания, коэффициента энергоемкости [4–5]. Имеющихся в литературе данных недостаточно для оценки параметров процесса резания мерзлых грунтов с включениями.



Динамограмма процесса резания мерзлого грунта с включениями  $P(x)$ :

1 – участки резания однородного грунта; 2 – участки вырывания (вдавливания) включений; 3 – участки резания включений

Для исследования влияния включений в мерзлых грунтах на параметры процесса резания была проведена серия экспериментов на лабораторном стро-

гальном стенде. Сравнивались параметры резания образцов из мерзлых однородных грунтов (песка и суглинка) и образцов, приготовленных из тех же грунтов, но с включениями. В процессе единичного эксперимента измерялись временные зависимости усилия резания  $P(t)$  и перемещения резца  $x(t)$ . На предварительном этапе обработки экспериментальной информации из двух зависимостей  $P(t)$  и  $x(t)$  формировалась зависимость усилия резания от перемещения  $P(x)$  (динамограмма). На рисунке изображена типичная динамограмма процесса резания мерзлых грунтов с включениями.

На рисунке цифрой 1 обозначены участки резания однородного мерзлого грунта, которые состоят из чередующихся периодов возрастания и уменьшения усилия резания, что объясняется накоплением напряжений в грунтовой среде и последующим отрывом стружки от массива грунта. Длина периода образования стружки, длины составляющих этого периода, максимальное усилие резания являются случайными величинами и легко определяются экспериментально. Для однородных грунтовых сред уровень флуктуаций указанных выше параметров относительно невелик, поэтому для ряда задач, связанных с разработкой мерзлых грунтов многолезцовыми рабочими органами, целесообразно рассматривать детерминированную модель из работы [6].

Специфика резания мерзлых грунтов с включениями состоит в том [4], что участки резания вмещающего включения однородного массива грунта чередуются с участками двух основных видов взаимодействия резца с включениями: резания материала включения (на рисунке участки помечены цифрой 3); вырывания (вдавливания) включения (на рисунке участки помечены цифрой 2). Динамограмма резания материала включения внешне похожа на динамограмму резания однородного грунта со значительно отличающимися уровнями параметров. Процессы вырывания (вдавливания) включения описываются возрастающей функцией с резким падением, они проявляются на динамограмме сравнительно узкими пиками.

К параметрам, характеризующим процесс резания мерзлого грунта с включениями, относятся (рисунок): максимальные значения усилия резания –  $P_{\max i}$ ; длина участков резания однородного грунта –  $l_{oi}$ ; резания включений –  $l_{pi}$ ; вырывания включений –  $l_{Bi}$ . Все эти параметры являются случайными величинами. Средние значения длин участков резания  $\bar{l}_p$  и вырывания  $\bar{l}_B$  включений зависят от усредненного размера включений  $\bar{d}_B$ , мм [7–8]. Общая длина резания  $L$  и ее составляющих  $L_o$ ,  $L_p$ ,  $L_B$  определяется средними длинами  $\bar{l}_p$ ,  $\bar{l}_B$ , средними числами включений  $\bar{n}_p$ ,  $\bar{n}_B$  и средней длиной участка однородного грунта между включениями  $\bar{l}_o$ :

$$L = \bar{n}_p \cdot \bar{l}_p + \bar{n}_B \cdot \bar{l}_B + (\bar{n}_p + \bar{n}_B) \bar{l}_o = w_p L + w_B L + w_o L = L_p + L_B + L_o. \quad (1)$$

Здесь  $w_p$ ,  $w_B$ ,  $w_o$  – соответствующие вклады в общую длину резания.

В результате статистической обработки значительного количества динамограмм с погрешностью, не превосходящей 5 %, было получено

$$\bar{l}_p \approx \bar{l}_B \approx \bar{d}_B. \quad (2)$$

### Влияние включений в мерзлых грунтах на среднемаксимальное значение силы резания

В процессе экспериментов по динамограммам оценивались значения параметра  $K_B$ , вычисляемого по формуле [9]

$$K_B = \frac{\overline{P_{\max}}}{\overline{P_{\max B}}}, \quad (3)$$

где  $\overline{P_{\max}}$  и  $\overline{P_{\max B}}$  – среднемаксимальные усилия резания однородных грунтов и грунтов с включениями.

Известно, что усилие резания однородных мерзлых грунтов зависит от его вида, температуры  $t$ , влажности  $\omega$ , фракционного состава [9–10].

**Температура грунта.** Экспериментальным путем исследовалась зависимость  $K_B(t)$  для мерзлого песчаного грунта с включениями размером из двух диапазонов 10–20 мм и 20–40 мм, массовая доля включений  $m_B = 40$  %, влажность грунта  $\omega = 19$ –20 %, температура варьировалась в диапазоне от 0 до  $-15$  °С. Установили, что зависимость  $K_B(t)$  является возрастающей и ограниченной. Этот факт хорошо согласуется с физическими соображениями – прочностные характеристики материалов включений не зависят от температуры, а степень закрепления включения в грунте, начиная с некоторой температуры, остается неизменной. Для описания зависимости  $K_B(t)$  может быть использована аппроксимация

$$K_B(t) = K_{B\min}^t + (K_{B\max}^t - K_{B\min}^t)(1 - e^{-\alpha t}), \quad (4)$$

где  $K_{B\min}^t$ ,  $K_{B\max}^t$  – минимальное и максимальное значения параметра  $K_B$ , не зависящие от температуры;  $\alpha$  – параметр аппроксимации. Параметры  $K_{B\min}^t$ ,  $K_{B\max}^t$  и  $\alpha$  находятся методом наименьших квадратов (МНК). В качестве оценки точности аппроксимаций здесь и далее будем использовать максимум модуля относительной поточечной погрешности аппроксимации –  $\delta$ .

Для грунта с включениями размером 10–20 мм получены значения параметров аппроксимации (4) –  $K_{B\min}^t = 1,03$ ,  $K_{B\max}^t = 1,33$ ,  $\alpha = 0,64$  °С $^{-1}$ ,  $\delta = 0,7$  %.

Для грунта с включениями размером 20–40 мм –  $K_{B\min}^t = 1,04$ ,  $K_{B\max}^t = 1,53$ ,  $\alpha = 0,73$  °С $^{-1}$ ,  $\delta = 0,8$  %. Параметр  $K_B$  практически постоянен при  $t < -4$  °С.

**Влажность.** Зависимость  $K_B(\omega)$  экспериментально исследовалась для песчаного грунта температурой  $t = -8$  °С с включениями размером 10–20 мм, с массовой долей включений  $m_B = 40$  %. Влажность грунта  $\omega$  варьировали в диапазоне от 6 до 20 %. Грунт резали клиновидным резцом, толщина срезаемой стружки  $h = 10$  мм. Зависимость  $K_B(\omega)$  возрастает от единицы с насыщением и ее можно аппроксимировать выражением, аналогичным (4):

$$K_B(\omega) = 1 + K_{B\max}^\omega (1 - e^{-\beta\omega}). \quad (5)$$

Здесь  $K_{B\max}^\omega$ ,  $\beta$  – параметры аппроксимации.

Коэффициенты аппроксимации для приведенных выше условий найдены с помощью МНК –  $K_{B\max}^\omega = 0,4$ ,  $\beta = 0,06$  % $^{-1}$ ,  $\delta = 2,5$  %.

Помимо характеристик грунтовой среды на процесс резания влияют толщина стружки  $h$  и форма резца, ширина резца  $b$ , угол резания  $\alpha$ .

**Ширина резца.** Исследовался процесс резания мерзлых однородных песчаных грунтов и грунтов с включениями с температурой  $t = -5^\circ\text{C}$  и влажностью  $\omega = 17\%$  резцами шириной  $b$ , толщина стружки  $h = 15$  мм, угол резания  $\alpha = 90^\circ$ . Ширину резца  $b$  варьировали в диапазоне от 15 до 45 мм. В ходе анализа результатов экспериментов удалось установить, что зависимости среднемаксимальных усилий резания для однородных грунтов и грунтов с включениями являются возрастающими и ограниченными. Для аппроксимации указанных зависимостей может быть использована функция

$$\overline{P_{\max}^b} = P_{\min}^b + (P_{\max}^b - P_{\min}^b)(1 - e^{-\lambda b}), \quad (6)$$

где  $P_{\min}^b$ ,  $P_{\max}^b$ ,  $\lambda$  – коэффициенты аппроксимации.

В результате обработки экспериментальных зависимостей получили: для однородного грунта –  $P_{\min}^b = 0,22$ ,  $P_{\max}^b = 4,91$ ,  $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 0,6\%$ ; для грунта с включениями с размерами 10–20 мм –  $P_{\min}^b = 1,54$ ,  $P_{\max}^b = 7,78$ ,  $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 0,8\%$ ; для грунта с включениями с размерами 20–40 мм –  $P_{\min}^b = 1,82$ ,  $P_{\max}^b = 7,8$ ,  $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 1,5\%$ .

Характеры зависимостей  $\overline{P_{\max}^b}(b)$  для исследуемых грунтов похожи, поэтому аппроксимировали зависимость  $K_B(b)$  линейной регрессией

$$K_B(b) = A_b b + C_b. \quad (7)$$

В результате обработки экспериментальных данных для песчаного грунта с включениями с размером 10–20 мм были получены значения параметров регрессии (7) –  $A_b = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ ,  $C_b = 2,2$ ,  $\delta = 2,5\%$ . Для песчаного грунта с включениями с размерами 20–40 мм –  $A_b = -3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ ,  $C_b = 2,85$ ,  $\delta = 3,5\%$ .

**Угол резания.** Традиционно изменение усилия резания острым резцом в зависимости от угла резания  $\alpha$  оценивают с помощью коэффициента  $C(\alpha) = P(\alpha)/P(\alpha = 90^\circ)$ . Анализ результатов исследований резания мерзлых песчаных грунтов с параметрами  $t = -5^\circ\text{C}$  и  $\omega = 18\%$  показал, что коэффициенты  $C(\alpha)$  при фиксированном значении угла резания  $\alpha$  для однородных грунтов и грунтов с включениями с размером 2–10, 10–20 и 20–40 мм имеют близкие значения (расхождение не более 5%). Зависимость  $C(\alpha)$  описывается линейной функцией с погрешностью, не большей 3,5%:

$$C(\alpha) \approx 0,007\alpha + 0,37. \quad (8)$$

**Толщина стружки.** Для исследования зависимости  $K_B(h)$  был проведен ряд экспериментов по резанию песчаного грунта с температурой  $t = -5^\circ\text{C}$  и влажностью  $\omega = 17\%$  с включениями размером 2–10, 10–20 и 20–40 мм. Толщина срезаемой стружки  $h$  изменялась от 5 до 25 мм. Для любых размеров включений зависимость  $K_B(h)$  является убывающей до некоторой величины, характерной для конкретного размера включений. Зависимость  $K_B(h)$  может быть аппроксимирована регрессией следующего вида:

$$K_B(h) = K_{B_{\min}}^h + (K_{B_{\max}}^h - K_{B_{\min}}^h)e^{-\mu h}, \quad (9)$$

где  $K_{B_{\min}}^h$ ,  $K_{B_{\max}}^h$ ,  $\mu$  – параметры смещенной экспоненциальной регрессии.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие значения параметров аппроксимации (9): для размеров включений 2–10 мм –  $K_{B_{\min}}^h = 1$ ,  $K_{B_{\max}}^h = 2,2$ ,  $\mu = 0,17 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 2 \%$ ; для размеров включений 10–20 мм –  $K_{B_{\min}}^h = 1,127$ ,  $K_{B_{\max}}^h = 3,76$ ,  $\mu = 0,18 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 2 \%$ ; для размеров включений 20–40 мм –  $K_{B_{\min}}^h = 1,33$ ,  $K_{B_{\max}}^h = 5,25$ ,  $\mu = 0,165 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\delta = 1,2 \%$ .

Характер зависимости  $K_B(h)$  связан с отношением  $h/\bar{d}_B$  [9], значение которого определяет тот или иной сценарий механизма разрушения грунтов с включениями. Можно выделить три основных сценария. В первом сценарии основным видом взаимодействия реза с включениями является резание включений, в этом случае  $h/\bar{d}_B < 1$  (при ограничениях на значение  $\bar{d}_B$ ). При этом значения усилий резания и численные значения параметра  $K_B$  велики. При выполнении соотношения  $h/\bar{d}_B \approx 1$  относительная доля случаев резания включений в общем числе взаимодействий реза с ними уменьшается, т. к. значительное число включений вырывается из массива грунта. Относительный уровень усилий резания при этом уменьшается, что ведет к снижению значения параметра  $K_B$ . В третьем сценарии, характеризуемом соотношением  $h/\bar{d}_B > 1$ , преимущественным процессом взаимодействия включений с резцом является вырывание включений из грунта.

Развитие процесса взаимодействия включения и реза по тому или иному сценарию зависит от степени закрепления включения в грунте, от прочности материалов включений и т. д.

Количественные характеристики описанных выше процессов зависят от размера включений [9]. Из анализа экспериментальных результатов можно сделать вывод, что для грунтов с включениями небольших размеров –  $\bar{d}_B \approx 10 \text{ мм}$  – значение параметра  $K_B$  при отношении  $h/\bar{d}_B > 1$  близко к 1. Это обусловлено тем, что при контакте включений малых размеров с резцом они практически мгновенно вырываются из окружающего массива грунта – узкий пик на динамограммах. Включения размерами  $\bar{d}_B = 10\text{--}20 \text{ мм}$  при взаимодействии с резами в основном вырываются из массива грунта, максимальные усилия превосходят максимальные усилия резания однородного грунта. Функция  $K_B(h/\bar{d}_B)$  является убывающей. Включения с размерами  $\bar{d}_B > 20 \text{ мм}$  разрушаются при взаимодействии с резами путем вырывания и резания. Доля резаний возрастает с увеличением размера включений. Поэтому функция  $K_B(h/\bar{d}_B)$  также является убывающей, стремясь к определенному уровню, зависящему от характеристик включений и однородной фазы грунта.

Анализ результатов экспериментальных зависимостей  $K_B(h)$  позволяет сделать два основных вывода: значительного снижения динамических нагрузок на резцы и рабочие органы землеройных машин в целом при разработке мерзлых грунтов с включениями можно достичь в том случае, если толщины стружек будут превосходить размеры встречающихся включений; значение параметра  $K_B$  практически не зависит от температуры и влажности грунтов, ширины резца, угла резания и толщины стружки при  $h/\bar{d}_B > 0,5-0,8$ .

**Размер включений.** Состав грунтов с включениями определяется размерами и содержанием включений. Зависимости  $K_B(\bar{d}_B)$  изучались при строгании образцов из песка и суглинка с различными по размеру включениями при их массовом содержании  $m_B = 40\%$  и при отношении  $\bar{d}_B/h \approx 1,8$ . Удалось установить, что экспериментальные зависимости  $K_B(\bar{d}_B)$  являются возрастающими. Они могут быть аппроксимированы регрессией вида

$$K_B(\bar{d}_B) = 1 + A\bar{d}_B^{-\theta}. \quad (10)$$

В результате обработки с помощью МНК экспериментальных данных были получены значения параметров аппроксимации (10): для резания резцом шириной  $b = 25$  мм песчаного грунта с плотностью по ударнику ДорНИИ  $c = 510 - A = 2,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\theta = 1,69$ ; для резания резцом шириной  $b = 35$  мм песчаного грунта с параметром  $c = 460 - A = 3,6 \cdot 10^{-3}$ ,  $\theta = 1,57$ ; для резания суглинка  $- A = 1,1 \cdot 10^{-3}$ ,  $\theta = 1,75$ . Во всех случаях погрешность аппроксимации не превосходит 6%. Близость значений  $\theta$  для различных мерзлых грунтов свидетельствует об общем характере зависимостей для песчаного и суглинистого мерзлых грунтов с включениями.

**Массовое содержание включений.** Одним из параметров грунтов с включениями, влияющим на трудность их разработки, является  $m_B, \%$  – массовое содержание включений в грунте. В результате анализа экспериментальных данных удалось найти аппроксимацию зависимости  $K_B(m_B)$ :

$$K_B(m_B) = 1 + A_m m_B + B_m m_B^2 + C_m m_B^3. \quad (11)$$

Для песчаного грунта влажностью 23% и температурой  $-7^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 2-10$  мм были получены следующие значения параметров и погрешности аппроксимации (11):  $A_m = -2,48 \cdot 10^{-4}$ ,  $B_m = 1,07 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_m = -1,8 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta = 2\%$ . Для песчаного грунта влажностью 19% и температурой  $-3^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 10-20$  мм  $- A_m = 9,56 \cdot 10^{-3}$ ,  $B_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ ,  $C_m = -1,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta = 2,5\%$ . Для суглинка влажностью 24% и температурой  $-7^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 20-40$  мм  $- A_m = 9,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $B_m = 5,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $C_m = -2 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta = 1,5\%$ . Для песчаного грунта влажностью 18% и температурой  $-6^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 20-40$  мм  $- A_m = 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $B_m = -4,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_m = 1,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta = 2\%$ . Для суглинка влажностью 24% и температурой  $-7^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 20-40$  мм  $- A_m = 2,6 \cdot 10^{-2}$ ,  $B_m = -2,1 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_m = 8 \cdot 10^{-7}$ ,  $\delta = 3,5\%$ .

Анализ полученных результатов показал, что при небольших по размеру включениях значение параметра  $K_B$  практически одинаково при массовой

доле включений  $m_B$ , меньшей 60 %. Это объясняется тем, что свойства грунтов с включениями  $d_B < 10$  мм, определяющие нагрузки на резцы при их остром состоянии, близки к свойствам соответствующих однородных грунтов.

При наличии в грунтах более крупных включений зависимость  $K_B(m_B)$  имеет экстремальный характер, и максимальных значений параметр  $K_B$  достигает при  $m_B = 40\text{--}60$  %.

### Влияние включений в мерзлых грунтах на коэффициент энергоемкости

Для нахождения среднего значения усилия резания грунта необходимо умножить среднемаксимальное значение усилия резания на коэффициент энергоемкости  $K_{\Sigma}$  [9]. Коэффициент энергоемкости однородных грунтов зависит в основном от гранулометрического состава.

Коэффициент энергоемкости  $K_{\Sigma}$  резания грунта с включениями может быть оценен с помощью формулы

$$K_{\Sigma} = w_0 K_{\Sigma 0} + w_p K_{\Sigma p} + w_B K_{\Sigma B}, \quad (12)$$

где  $K_{\Sigma 0}$ ,  $K_{\Sigma p}$ ,  $K_{\Sigma B}$  – коэффициенты энергоемкости при разработке однородной фазы грунта при резании и при вырывании (вдавливании) включения.

Вклад резания включений в общее количество взаимодействий реза с включениями характеризуется коэффициентом  $C_p = n_p / (n_p + n_B)$ . Общее число контактов равно отношению  $L$  к среднему значению расстояния между включениями  $\overline{p_B}$ . С учетом этого и формул (1) – (2) выражение (12) примет вид

$$K_{\Sigma} = K_{\Sigma 0} \left(1 - \overline{d_B} / \overline{p_B}\right) + \left[ K_{\Sigma B} (1 - C_p) + K_{\Sigma p} C_p \right] \overline{d_B} / \overline{p_B}. \quad (13)$$

Экспериментально удалось доказать, что коэффициент  $C_p$  наиболее существенно зависит от размеров включений. Для мерзлого грунта с параметрами  $\omega = 20$  %,  $t = -6$  °С,  $h = 15$  мм с включениями различных размеров с массовым содержанием  $m_B = 40$  % удалось получить аппроксимацию для описания экспериментальной зависимости  $C_p(\overline{d_B})$ ,  $\overline{d_B} \leq 60$  мм с погрешностью 10 %

$$C_p(\overline{d_B}) = 5 \cdot 10^{-5} \overline{d_B}^{-2}. \quad (14)$$

Анализ результатов экспериментов показал, что параметр  $\overline{p_B}$  зависит от характеристик грунтов –  $m_B$ ,  $\overline{d_B}$ , свойств однородной фазы грунтов и толщины срезаемой стружки  $h$ .

Экспериментальная зависимость  $\overline{p_B}(m_B)$  для любого типа мерзлых грунтов имеет минимум в диапазоне  $m_B$  от 48 до 55 %. Для аппроксимации  $\overline{p_B}(m_B)$  применим полином третьей степени

$$\overline{p_B}(m_B) = A_m^p + B_m^p m_B + C_m^p m_B^2 + D_m^p m_B^3. \quad (15)$$

Для песчаного грунта влажностью 19 % и температурой  $-8$  °С с включениями размером  $d_B = 10\text{--}20$  мм при толщине стружки  $h = 15$  мм получили значения параметров аппроксимации (15) –  $A_m^p = 233$ ,  $B_m^p = -9,25$ ,  $C_m^p = 0,153$ ,

$D_m^p = -7,7 \cdot 10^{-4}$ ,  $\delta = 8\%$ . Для суглинка влажностью 24 % и температурой  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 20\text{--}40$  мм при толщине стружки  $h = 15$  мм –  $A_m^p = 244$ ,  $B_m^p = -6,84$ ,  $C_m^p = 8 \cdot 10^{-2}$ ,  $D_m^p = -2,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\delta = 4\%$ . Для песчаного грунта влажностью 18 % и температурой  $-6\text{ }^\circ\text{C}$  с включениями размером  $d_B = 20\text{--}40$  мм при толщине стружки  $h = 15$  мм –  $A_m^p = 349$ ,  $B_m^p = -15,6$ ,  $C_m^p = -0,322$ ,  $D_m^p = -2,19 \cdot 10^{-3}$ ,  $\delta = 4\%$ .

Зависимость  $\overline{p_B}(d_B)$  описывается линейной регрессией в диапазоне изменения  $\overline{d_B}$  от 10 мм до 55 мм

$$\overline{p_B}(d_B) = A_d^p \overline{d_B} + B_d^p. \quad (16)$$

В результате обработки экспериментальных данных для песчаных грунтов влажностью 20 % и температурой  $-4\text{ }^\circ\text{C}$  с массовой долей включений 40 % и толщиной стружки 15 мм были получены следующие значения параметров линейной регрессии:  $A_d^p = 1,9$ ,  $B_d^p = 40$  мм.

Зависимость  $\overline{p_B}(h)$  является возрастающей с насыщением в диапазоне изменения  $h$  от 5 до 25 мм и может быть аппроксимирована функцией

$$\overline{p_B}(h) = p_{B_{\min}}^h + (p_{B_{\max}}^h - p_{B_{\min}}^h)(1 - e^{-\eta h}). \quad (17)$$

В результате обработки экспериментальных данных для песчаных грунтов влажностью 18 % и температурой  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  с массовой долей включений 40 % и толщиной стружки 15 мм были получены следующие значения параметров аппроксимации:  $\eta = 0,049\text{ мм}^{-1}$ ,  $p_{B_{\min}}^h = 9,4$  мм,  $p_{B_{\max}}^h = 176$  мм,  $\delta = 6\%$ .

Используя уравнение (13), а также все необходимые зависимости (14) – (17) и найдя экспериментально  $K_{Э0}$ ,  $K_{ЭР}$ ,  $K_{ЭВ}$ , можно рассчитать зависимость коэффициента энергоёмкости резания грунтов с включениями от  $m_B$ ,  $\overline{d_B}$  и  $h$ .

### Оценка среднемаксимального усилия резания мерзлых грунтов со сложными включениями

Выражение для оценки среднемаксимального усилия резания мерзлого грунта с несколькими фракциями выводится из формул (1), (3) с учетом долей взаимодействия резца с каждой из  $N$  фракций:

$$\overline{P_{\max B}} = \overline{P_{\max}} \left[ 1 + \sum_{i=1}^N (K_{Bi} - 1) L_{P, Bi} / L \right]. \quad (18)$$

Здесь  $K_{Bi}$  – коэффициент сложности разработки грунта с  $i$ -й фракцией включений;  $L_{P, Bi}$  – длина взаимодействия резца с  $i$ -й фракцией включения.

Наибольшее влияние на относительное изменение параметров процесса резания острым инструментом грунтов с включениями оказывает гранулометрический состав – размер и содержание включений.

Таким образом, полученные в работе выражения (1) – (18) могут быть использованы для расчета параметров процессов резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями, а также для подбора режущих ин-

струментов и рабочих органов землеройных машин при наличии данных о гранулометрическом составе включений, влажности и температуре грунта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зеленин, А.Н.* Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
2. *Ветров, Ю.А.* Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 337 с.
3. *Панов, И.М.* Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. – Киев : Феникс, 2008. – 223 с.
4. *Васильев, С.И.* Исследование процесса резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными рабочими органами / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 4 (8). – С. 145–153.
5. *Физическая картина взаимодействия зуба землеройной машины с крупнообломочным включением в мерзлой породе и определение сопротивления резанию* / С.Н. Иванченко, С.А. Шемякин, А.Ю. Чебан, И.С. Рашеня // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 45–52.
6. *Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин* / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов, К.Б. Бидя, А.Д. Кухаренко // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 9. – С. 28–30.
7. *Королев, И.В.* Пути экономии битума в строительстве / И.В. Королев. – М. : Транспорт, 1988. – 149 с.
8. *Кириллов, Ф.Ф.* Статистический подход к оценке параметров крупнозернистой составляющей глинистой галечно-гравийной грунтовой среды / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 3. – С. 102–107.
9. *Лецинер, В.Б.* Совершенствование инструмента для резания мерзлых грунтов / В.Б. Лецинер. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1991. – 212 с.
10. *Учёт физико-механических свойств мерзлых грунтов при проектировании землеройных машин* / Ф.Ф. Кириллов, Г.И. Митерев, С.М. Кравченко, В.А. Слепченко // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 12. – С. 29–31.

#### REFERENCES

1. *Zelenin, A.N.* *Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami* [Fundamentals of mechanical soil failure]. Moscow : Izdatel'stvo Mashinostroenie, 1968. 376 p. (rus)
2. *Vetrov, Yu.A.* *Rezanie gruntov zemleroinymi mashinami* [Excavating by earthmovers]. Moscow : Izdatel'stvo Mashinostroenie, 1971. 337 p. (rus)
3. *Panov, I.M., Vetokhin, V.I.* *Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv* [Physical principles of soil mechanics]. Kiev: Feniks, 2008. 223 p. (rus)
4. *Vasil'ev, S.I., Eresko, S.P.* *Issledovanie protsessa rezaniya merzlykh gruntov s graviinogalechnikovymi vklyuchenyami rotornymi rabochimi organami* [A study of cutting process of ice soil with gravel and boulder inclusions by rotary operating elements]. *Systems. Methods. Technologies*. 2010. No. 4 (8). Pp. 145–153. (rus)
5. *Ivanchenko, S.N., Shemyakin, S.A., Cheban, A.Yu., Rashchenya, I.S.* *Fizicheskaya kartina vzaimodeistviya zuba zemleroinoi mashiny s krupnooblomochnym vklyucheniem v merzloi porode i opredelenie soprotivleniya rezaniyu* [Physics of interaction between a cutter and multifragmental inclusions and determination of cutting resistance]. *Pacific National University Publ*. 2012. No. 4. Pp. 45–52. (rus)
6. *Kirillov, F.F., Osipov, S.P., Bida, K.B., Kukharenyk, A.D.* *Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogoreztsovykh rabochikh organov zemleroinykh mashin* [Determined mathematical model of time distribution of mov-

- ing force for multicut operating elements of earthmovers]. *Construction and Road Building Machinery*. 2010. No. 9. Pp. 28–30. (rus)
7. Korolev, I.V. Puti ekonomii bituma v stroitel'stve [Bitumen-saving methods in construction]. Moscow: Transport, 1988. 149 p. (rus)
  8. Kirillov, F.F., Osipov, S.P. Statisticheskii podkhod k otsenke parametrov krupnozernistoi sostavlyayushchei glinistoi galechno-graviinnoi gruntovoi sredy [Statistical approach to estimating parameters of multifragmental components of clayey gravel and boulder soil]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007. No. 3. Pp. 102–107. (rus)
  9. Leshchiner, V.B. Sovershenstvovanie instrumenta dlya rezaniya merzlykh gruntov [Cutting tools improvement for ice soils]. Tomsk : TSU Publishing House. 1991. 212 p. (rus)
  10. Kirillov, F.F., Miterev, G.I., Kravchenko, S.M., Slepchenko, V.A. Uchet fiziko-mekhanicheskikh svoystv merzlykh gruntov pri proektirovanii zemleroinnykh mashin [Mechanical-and-physical properties of ice soils at earthmover design]. *Construction and Road Building Machinery*. 2007. No. 12. Pp. 29–31. (rus)

УДК 624.132: 69.002.5

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук,  
osip1809@rambler.ru  
АНПИЛОГОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ, аспирант,  
011\_paul@sibmail.com  
КРАВЧЕНКО СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
kravchenkosm.1951@mail.ru  
НЕГОДИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ, ст. преподаватель,  
semerka.82@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ИМИТАЦИОННО-ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ МНОГОРЕЗЦОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН**

Разработана имитационно-эмпирическая модель временного распределения тягового усилия многорезцовых рабочих органов землеройных машин, основанная на разделении процессов резания и внедрения резцов в грунтовую среду. Модель применима для фрезерных и баровых рабочих органов. Модель позволяет легко учесть износ резцов.

**Ключевые слова:** тяговое усилие; временное распределение; рабочий орган; бар; фреза; резание грунтов; гравийно-галечные включения; износ; резцы; имитационное моделирование.

*SERGEI P. OSIPOV, PhD, A/Professor,  
osip1809@rambler.ru  
PAVEL V. ANPILOGOV, Research Assistant,  
011\_paul@sibmail.com  
SERGEI M. KRAVCHENKO, PhD, A/Professor,  
kravchenkosm.1951@mail.ru  
ALEKSANDR V. NEGODIN, Senior Lecturer,  
semerka.82@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **EMPIRICAL MODEL SIMULATED FOR MOVING FORCE TIME DISTRIBUTION OF MULTICUT OPERATING ELEMENTS**

The paper presents a simulated empirical model for time distribution of moving force produced by multi-cut operating bodies of earth-moving machines. The model is based on separation of the cutting process from cutting tool penetration in soil ground. This model can be used for mil and jig operating elements. The model allows for detecting a cutting tool wear.

**Keywords:** moving force; time distribution; operating elements; jig; mil; soil cutting; gravel and boulder inclusions; wear; cutting tool; simulation modeling.

Временное распределение тягового усилия является наиболее полной характеристикой динамического процесса разработки грунтовых сред много-резцовыми рабочими органами землеройных машин [1, 2]. В настоящее время существует большое количество способов измерения усилий и приборов, их реализующих [3, 4], которые обладают высокой точностью, производительностью, способностью надежно функционировать в экстремальных условиях, возможностью фиксации и долговременного хранения информации. Натурное моделирование процессов резания бывает очень сложно осуществить. Сложность экспериментальных исследований влияния различных физико-механических и технических факторов на процесс разработки грунтов связана с многообразием характеристик процесса разработки. К указанным характеристикам относятся физико-механические параметры грунтовой среды (температура, влажность, вид грунта, массовая доля и фракционный состав включений и т. д.), а также параметры резания (толщина стружки, форма резца, ширина резца, количество резцов, тип взаимодействия их с разрабатываемой средой, угол резания, скорость резания, тип рабочего органа и т. д.). Отсюда следует необходимость в разработке имитационных моделей временных распределений тягового усилия многорезцовых рабочих органов.

В работе [5] приводится детерминированная модель временного распределения тягового усилия многорезцовых рабочих органов, достоинством которой является возможность учета количества резцов, находящихся в постоянном контакте с разрушаемой средой, и скорости резания. Ограниченность модели связана с ее областью применения – резание однородных грунтов с мелким хрупким разрушением. Особенность же резания более сложных в разработке грунтовых сред, к которым, безусловно, относятся и мерзлые грунты с включениями, заключается в том, что параметры, описывающие единичный акт формирования и сбрасывания стружки, и параметры других видов взаимодействия резцов с разрабатываемой средой являются случайными величинами. Кроме того, характеристики этих случайных величин изменяются в процессе эксплуатации, т. к. разработка грунтов, а тем более мерзлых грунтов с включениями, сопровождается интенсивным абразивным износом режущих резцов землеройных машин [6, 7], приводящим к образованию поверхностей износа на рабочих гранях. Наличие поверхностей износа приводит к появлению дополнительных сопротивлений резанию и, соответственно, к снижению производительности землеройной машины. Интенсивность абразивного износа и сценарии износа зависят от физико-механических характеристик разрушаемой среды, формы и материала режущего инструмента, угла резания и т. п. [8, 9].

Для построения имитационных моделей временных распределений тягового усилия многорезцовых рабочих органов модифицируем подход, изложенный в работе [9], основанный на принципе аддитивности усилий от каждого резца и разложении результирующей силы на  $i$ -м единичном резце на касательную  $P_{ti}$  и нормальную составляющую  $P_{ni}$ . Существует два основных типа многорезцовых рабочих органов – фрезерный и баровый, внешний вид которых представлен на рис. 1.

Формула для оценки тягового усилия  $F$  (усилия подачи [9]) многолезцового рабочего органа в момент времени  $t$  имеет следующий вид:

$$F(t) = \sum_{i=1}^N C_i(t) [P_{\tau i}(t) \sin \varphi_i(t) + P_{ni}(t) \cos \varphi_i(t)], \quad (1)$$

где  $N$  – общее число резцов рабочего органа;  $C_i(t)$  – ступенчатая функция, которая показывает, взаимодействует ли  $i$ -й резец в момент времени  $t$  с разрушаемой средой;  $\varphi_i(t)$  – угол между вертикалью и касательной к поверхности резания в точке, в которой находится  $i$ -й резец в момент времени  $t$ .

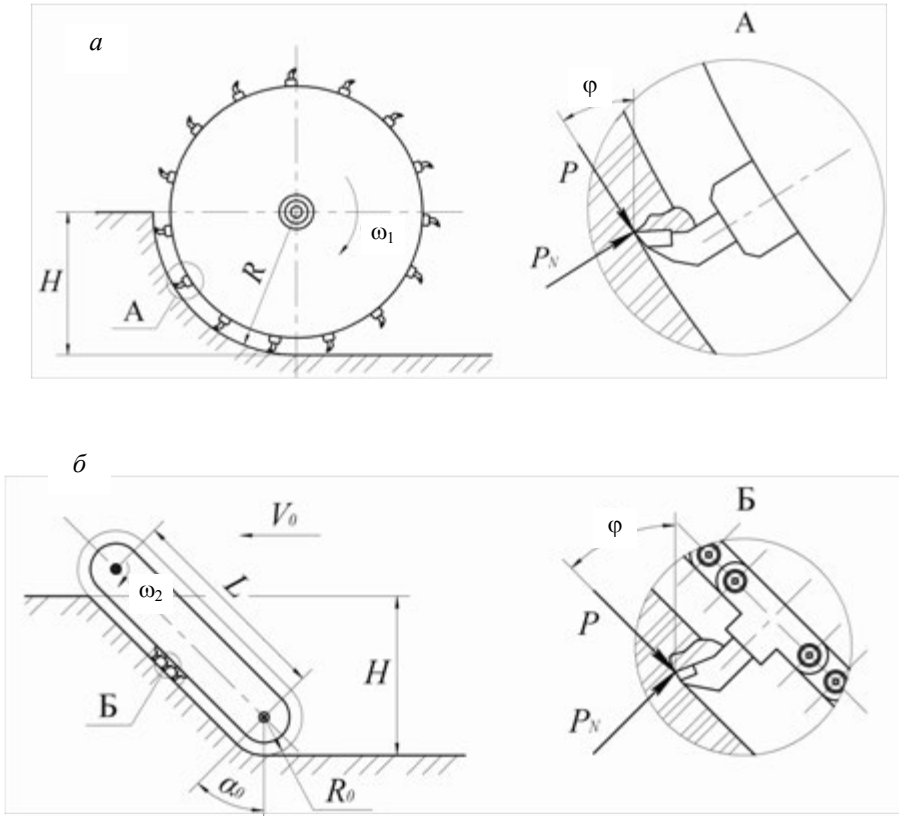


Рис. 1. Схема резания грунтовой среды:  
 а – фрезерный рабочий орган; б – баровый рабочий орган

**Пояснение 1.** Для каждого резца движение по телу рабочего органа является периодическим. Если тело рабочего органа представляет собой цилиндрическую поверхность, то период указанного движения  $T$  для всех резцов будет одним и тем же, и он определяется формой и размерами тела рабочего органа и угловой скоростью ведущих звездочек.

Приведем выражения для оценки периодов  $T_1$ ,  $T_2$  для фрезерных (фреза) и баровых (бар) рабочих органов:

$$\text{для фрезы} \quad T_1 = \frac{1}{\omega_1}, \quad (2)$$

$$\text{для бара} \quad T_2 = \frac{2L + 2\pi R_0}{\omega_2 R_0}, \quad (3)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости вращения фрезы и ведущей звездочки барового рабочего органа;  $L$  – длина прямолинейного участка цепи бара со стороны разрабатываемой среды;  $R_0$  – радиус ведущей звездочки барового рабочего органа по резцам.

Формулы для вычисления функций  $\varphi_i(t)$  для фрезерного рабочего органа могут быть найдены с помощью формулы

$$\varphi_i(t) = \frac{\pi}{2} - \left[ \alpha_{0i} + \omega_1 \left( t - T_1 \operatorname{int} \left( \frac{t}{T_1} \right) \right) \right], \quad (4)$$

где  $\alpha_{0i}$  – начальные угловые координаты  $i$ -го резца;  $\operatorname{int}(x)$  – здесь и далее целая часть числа  $x$ .

Выведем формулы для вычисления функций  $\varphi_i(t)$  для барового рабочего органа. Введем криволинейную систему координат, связанную с рабочим телом барового рабочего органа. Начало координат  $O$  – это нижняя точка касания резцом разрабатываемой среды. Координатой точки во введенной системе координат является  $l(t)$  – расстояние от точки  $O$  до точки, в которую переместится резец за время  $t$ . Формула для определения текущего положения  $i$ -го резца на теле рабочего органа имеет вид

$$l_i(t) = l_{0i} + \omega_2 R_0 \left( t - T_2 \operatorname{int} \left( \frac{t}{T_2} \right) \right), \quad (5)$$

где  $l_{0i}$  – начальная координата  $i$ -го резца.

Очевидно, что для резцов, контактирующих с разрабатываемой средой на прямолинейном участке резания, выполняется следующее соотношение:  $\alpha_i(t) = \alpha_0 = \operatorname{const}$ . Здесь угол  $\alpha_0$  – угол между вертикалью и перпендикуляром к прямолинейному участку резания, один из параметров барового рабочего органа. С учетом этого запишем обобщенное выражение для расчета зависимости  $\varphi_i(t)$ :

$$\varphi_i(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \alpha_0, & \alpha_0 R_0 \leq l_i(t) \leq \alpha_0 R_0 + L, \\ \frac{\pi}{2} - \alpha_0, & (\alpha_0 + \pi) R_0 + L \leq l_i(t) \leq (\alpha_0 + \pi) R_0 + 2L, \\ \frac{\pi}{2} - \omega_2 t, & 0 \leq l_i(t) \leq \alpha_0 R_0, (\alpha_0 + \pi) R_0 + 2L \leq l_i(t) \leq 2\pi R_0 + 2L, \\ \frac{\pi}{2} - \omega_2 t, & \alpha_0 R_0 + L \leq l_i(t) \leq (\alpha_0 + \pi) R_0 + L. \end{cases} \quad (6)$$

Для рассматриваемого случая касательная составляющая  $P_{\tau i}$  есть не что иное, как усилие резания. Естественное предположение – для одинаковых

резцов, одного и того же грунта и фиксированных условий резания характеристики соответствующих случайных процессов близки друг к другу. Из этого предположения следует, что при анализе временных зависимостей усилий резания  $F(t)$  могут быть использованы экспериментальные динамограммы процесса резания  $P(t)$ .

**Пояснение 2.** С целью учета изменения параметров процесса резания, обусловленного абразивным износом, весь период эксплуатации рабочего органа разбивается на несколько временных интервалов, в каждом из которых значения параметров, характеризующих процесс резания, считаются неизменными. Для простоты рассуждений примем допущение об одинаковой длительности указанных выше временных интервалов.

Исходя из замечания 1, можно сделать вывод, что для каждого резца, который изначально находится или не находится в контакте с разрушаемой грунтовой средой, горизонтальное перемещение  $\Delta x$  за промежуток времени  $T$  находится по формуле

$$\Delta x = V_0 T, \quad (7)$$

где  $V_0$  – скорость горизонтального перемещения рабочего органа.

Очевидно, что усилие вдавливания формируют только резцы, находящиеся в непосредственном контакте с грунтовой средой, и для них упомянутое перемещение можно интерпретировать как горизонтальное внедрение в грунт. Но эти резцы жестко связаны с резцами, которые в данный момент времени  $t$  не разрушают среду, поэтому горизонтальное усилие вдавливания  $P_T(t)$  находится по формуле

$$P_T(t) = V_0 T \sum_{i=1}^N C_i(t) k_i(t), \quad (8)$$

где  $k_i(t)$  – коэффициент сопротивления грунта внедрению  $i$ -го резца.

С учетом выражения (8) формула для оценки тягового усилия примет следующий вид:

$$F(t) = \sum_{i=1}^N C_i(t) [P_i(t) \sin \varphi_i(t) + V_0 T k_i(t)]. \quad (9)$$

Функции  $C_i(t)$  для фрезерного рабочего органа и барового рабочего органа имеют различный вид:

$$\text{для фрезы } C_i(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \varphi_{0i} + \omega_1 \left( t - T \operatorname{int} \left( \frac{t}{T} \right) \right) \leq \arccos \left( \frac{R-H}{R} \right), \\ 0, & \arccos \left( \frac{R-H}{R} \right) < \varphi_{0i} + \omega_1 \left( t - T \operatorname{int} \left( \frac{t}{T} \right) \right) < 2\pi, \end{cases} \quad (10)$$

где  $R$  – радиус фрезы;  $H$  – глубина копания;

$$\text{для бара } C_i(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq l_i(t) \leq \alpha_0 R_0 + \frac{H - R_0}{\cos \alpha_0}, \\ 0, & \frac{3}{2} \pi R_0 + 2L < l_i(t) \leq 2\pi R_0 + 2L. \end{cases} \quad (11)$$

При необходимости в выражение (9) вводятся дополнительные слагаемые, описывающие процессы трения резцов, не находящихся в состоянии режима резания, но контактирующих с телом рабочего органа. Дополнительные слагаемые вводятся в том случае, если их доля в тяговом усилии является существенной.

Разумеется, описанный выше подход отличается некоторой условностью, но он не нарушает принципа аддитивности усилий и более логично объясняет с физической точки зрения процесс резания грунтовой среды по двум видам траектории.

Выражения (2) – (11), дополненные описанием динамики взаимодействия резца с грунтовой средой, позволяют определить временные зависимости тягового усилия рабочего органа и для установившегося режима резания, и для начального периода резания. Они могут послужить основой алгоритма имитационного моделирования тягового усилия не только традиционных многорезцовых рабочих органов землеройных машин, но и более перспективных комбинированных рабочих органов [10].

Общее описание динамики процесса резания грунтовой среды с включениями сводится к следующему – участки резания однородного мерзлого грунта чередуются с участками резания прочных гравийно-галечных включений и участками вырывания или вдавливания таких включений [11].

Динамограммы резания однородного мерзлого грунта и включений состоят из чередующихся периодов возрастания и уменьшения усилия резания (рис. 2, а), описываемых треугольными функциями, что объясняется накоплением напряжений в грунтовой среде (включения) и последующим отрывом стружки от массива грунта (включения). Указанная функция описывается выражением

$$f(\tau) = \begin{cases} P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{t_{\max}} \tau, & 0 \leq \tau \leq t_{\max}, \\ P_{\max} - \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\Delta t - t_{\max}} (\tau - t_{\max}), & t_{\max} \leq \tau \leq \Delta t, \end{cases} \quad (12)$$

где  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  – минимальное и максимальное значения усилия резания на единичном этапе образования стружки;  $\Delta t$  – длительность указанного этапа;  $t_{\max}$  – положение максимума.

Процесс вырывания включений и процесс скола включений описываются треугольной функцией с полочкой (рис. 2, б)

$$f(\tau) = \begin{cases} P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{t_{\max}} \tau, & 0 \leq \tau \leq t_{\max}, \\ P_{\max} - \frac{P_{\max} - P_{\min}}{t_{II} - t_{\max}} (\tau - t_{\max}), & t_{\max} \leq \tau \leq t_{II}, \\ P_{\min}, & t_{II} \leq \tau \leq T_B, \end{cases} \quad (13)$$

где  $t_{\Pi}$  – ширина (длительность) пика;  $T_B$  – длительность интервала взаимодействия.

Процесс вдавливания может быть описан (рис. 2, в) формулой (12) в случае пластического вдавливания включения либо трапецией для случая упругого вдавливания включения:

$$f(\tau) = \begin{cases} P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{t_{\max}} \tau, & 0 \leq \tau \leq t_{\max}, \\ P_{\max}, & t_{\max} \leq \tau \leq t_{\Pi}, \\ P_{\max} - \frac{P_{\max} - P_{\min}}{T_B - t_{\Pi}} (\tau - t_{\Pi}), & t_{\Pi} \leq \tau \leq T_B, \end{cases} \quad (14)$$

где  $t_{\max}$ ,  $t_{\Pi}$  – моменты начала и конца интервала, в котором значение усилия вдавливания близко к максимальному.

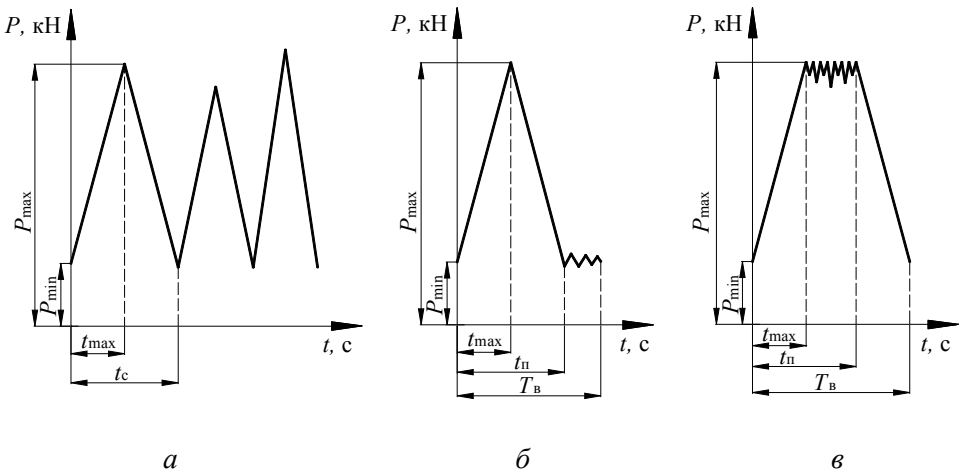


Рис. 2. Процессы единичного акта взаимодействия резца с грунтом:

а – резание однородного грунта (включения); б – пластическое вдавливание включения (скол, вырывание); в – упругое вдавливание

Для любых сценариев взаимодействия резца с разрабатываемой грунтовой средой минимальные и максимальные значения соответствующих усилий, длительности всех характерных интервалов являются случайными величинами, а их функции распределения определяются экспериментальным путем и используются далее для имитации процесса резания.

Функция вдавливания  $k(t)$ , в отличие от усилия резания, не описывается пульсирующими функциями. Для однородного грунта ее значение определяется текущим положением резца на теле рабочего органа. При взаимодействии резца по любому из других сценариев на функцию вдавливания влияют размеры включений, которые будут выступать в качестве штампов. Функция  $k(t)$  может быть представлена суммой гладкой функции и ступенчатых функций, длительность ступеней которых совпадает с длительностью промежутков

взаимодействия резцов с включениями. Очевидно, что значение функции  $k(t)$  в момент времени  $t$  является случайной величиной с соответствующей функцией распределения.

При наличии полного набора функций распределения случайных величин, упомянутых выше, имитация динамических процессов резания грунтов любых типов может быть осуществлена с помощью методов Монте-Карло [12]. Методы Монте-Карло широко используются в различных отраслях науки, в том числе для решения задач дорожного строительства [13] и взаимодействия резцов землеройных машин с разрушаемой абразивной средой [14].

**Пояснение 3.** В приведенной выше модели динамики резания грунтовой среды изменения параметров процесса, обусловленные износом, предлагается учитывать ступенчато, при необходимости можно изменить временной интервал анализа. Поверхности износа достаточно условно принято делить на передние и задние [9]. Увеличение площади передней поверхности износа приводит к существенному увеличению максимальных усилий при сколе включений, резании однородного грунта и включений. Влияние же на процессы вырывания и вдавливания включений передней поверхности износа не так существенно. Увеличение задней поверхности износа обуславливает возрастание максимальных усилий при вдавливании резцов в однородный грунт, при взаимодействии же резца с включением возрастания усилий практически не происходит, т. к. штампом продолжает оставаться включение.

### Вывод

Совокупность приведенных выше рассуждений, пояснений и выражений (2) – (11) является основой имитационно-эмпирической динамической модели процесса резания грунтовой среды любого типа, предназначенной для имитации динамограмм с помощью методов Монте-Карло. Модель позволит на базе экспериментальных данных исследовать влияние параметров грунтовой среды, характеристик рабочего органа, геометрических параметров резания на характеристики временного распределения тягового усилия.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Soldatenko, A.* Methods of Excavation Core Drilling / A. Soldatenko, H.Y. Jiang, A. Danilov // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – V. 90. – P. 3015–3025.
2. *Lindgren, M.* Excavation in moraine and dense non-cohesive soil: Numerical analysis of soil behavior / M. Lindgren // Stockholm : Department of Civil and Architectural Engineering Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology, 2012. – 163 p.
3. *Johnson, L.L.* Measurement of force to excavate extraterrestrial regolith with a small bucket-wheel device / L.L. Johnson, R.H. King // Journal of Terramechanics. – 2010. – V. 47. – No. 2. – P. 87–95.
4. *Patel, B.P.* Soil-Tool Interaction as a Review for Digging Operation of Mini Hydraulic Excavator / B.P. Patel, J.M. Prajapati // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – V. 3. – No. 2. – P. 894–901.
5. *Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многорезцовых рабочих органов землеройных машин* / Ф.Ф. Кириллов,

- С.П. Осипов, К.Б. Бида, А.Д. Кухаренко // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 9. – С. 28–30.
6. Кириллов, Ф.Ф. Расчет временного изменения формы резцов землеройных машин в процессе износа / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 12. – С. 55–61.
  7. Венцель, Е.С. Анализ факторов, снижающих износостойкость режущих элементов землеройно-транспортных систем / Е.С. Венцель, А.В. Щукин, С.В. Оноприенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2012. – № 57. – С. 312–315.
  8. Кириллов, Ф.Ф. Сценарии износа режущего инструмента землеройных машин / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 12. – С. 25–28.
  9. Лещинер, В.Б. Совершенствование инструмента для резания мерзлых грунтов / В.Б. Лещинер // Томск : Изд-во Том. ун-та, 1991. – 212 с.
  10. Кириллов, Ф.Ф. Траншеекопатель / Ф.Ф. Кириллов, П.В. Анпилогов, А.Д. Кухаренко // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 2. – С. 60.
  11. Васильев, С.И. Исследование процесса резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными рабочими органами / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 4 (8). – С. 145–153.
  12. Ермаков, С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике: ввод. курс / С.М. Ермаков. – М. ; СПб. : БИНОМ. Лаборатория знаний; Нев. диалект, 2009. – 192 с.
  13. Толстиков, Н.П. Применение метода Монте-Карло при оценке уровня надежности монолитных слоев дорожных одежд с использованием результатов штаповых испытаний / Н.П. Толстиков, С.О. Рудыкин, А.С. Голич // Дороги и мосты. – 2007. – № 1. – С. 47–54.
  14. Статистическое моделирование процессов износа резцов землеройных машин / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов, А.Д. Кухаренко, А.В. Негодин // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 11/12. – С. 112–117.

## REFERENCES

1. Soldatenko, A., Jiang, H. Y., Danilov, A. Methods of Excavation Core Drilling. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. V. 90. Pp. 3015–3025.
2. Lindgren, M. Excavation in moraine and dense non-cohesive soil: Numerical analysis of soil behavior. Stockholm : Department of Civil and Architectural Engineering Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology, 2012. 163 p.
3. Johnson, L.L., King, R.H. Measurement of force to excavate extraterrestrial regolith with a small bucket-wheel device. *Journal of Terramechanics*. 2010. V. 47. No. 2. Pp. 87–95.
4. Patel, B.P., Prajapati, J.M. Soil-tool interaction as a review for digging operation of mini hydraulic excavator. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. V. 3. No. 2. Pp. 894–901.
5. Kirillov, F.F., Osipov, S.P., Bida, K.B., Kukharenko, A.D. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogoreztsovykh rabochikh organov zemleroynykh mashin [Deterministic model of traction time distribution for multicut operating elements of earth-moving machines]. *Construction and Road Building Machinery*. 2010. No 9. Pp. 28–30. (rus)
6. Kirillov, F.F., Osipov, S.P. Raschet vremennogo izmeneniya formy reztsov zemleroynykh mashin v protsesse iznosa [Calculation of time change of cutting tool form of earthmoving machines during wearing process]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007. No 12. Pp. 55–61. (rus)
7. Venttsel', E.S., Shchukin, A.V. Onoprienko, S.V. Analiz faktorov, snizhayushchikh iznosostoykost' rezhushchikh elementov zemleroino-transportnykh sistem [Factors reducing wear resistance of cutting elements of earth-moving systems]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2012. No 57. Pp. 312–315. (ukr)

8. Kirillov, F.F., Osipov, S.P. Stsenarii iznosa rezhushchego instrumenta zemleroinykh mashin [Cutting tool wear of earth-moving machines]. *Construction and Road Building Machinery*. 2008. No. 12. Pp. 25–28. (rus)
9. Leshchiner, V.B. Sovershenstvovanie instrumenta dlya rezaniya merzlykh gruntov [Improvement of cutting tools for ice soil]. Tomsk: TSU Publishing House. 1991. 212 p. (rus)
10. Kirillov, F.F., Anpilogov, P.V., Kukhareno, A.D. Transheekopatel' [Trenching machine]. *Construction and Road Building Machinery*. 2011. No 2. Pp. 60. (rus)
11. Vasil'ev, S.I., Eresko, S.P. Issledovanie protsessa rezaniya merzlykh gruntov s graviinogalechnikovymi vklyucheniymi rotornymi rabochimi organami [Investigation of cutting ice soils with gravel and boulder inclusions by rotary operating elements]. *Systems. Methods. Technologies*. 2010. No 4 (8). Pp. 145–153. (rus)
12. Ermakov, C.M. Metod Monte-Karlo v vychislitel'noi matematike [Monte Carlo method in computer science] Moscow : The BKL Publishers; St-Petersburg : *Nevskii Dialekt Publ.*, 2009. 192 p. (rus)
13. Tolstikov, N.P., Rudykin, S.O., Golich, A.S. Primenenie metoda Monte-Karlo pri otsenke urovnya nadezhnosti monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd s ispol'zovaniem rezul'tatov shtampovykh ispytaniy [Method Monte Carlo in estimating the reliability of solid pavement layers using the plate test results]. *Dorogi i Mosty*. 2007. No 1. Pp. 47–54. (rus)
14. Kirillov, F.F., Osipov, S.P., Kukhareno, A.D., Negodin, A.V. Statisticheskoe modelirovanie protsessov iznosa reztsov zemleroinykh mashin [Statistical modeling of cutting tool wear of earthmoving machines]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010. No 11/12. Pp. 112–117. (rus)

## ВНЕ РУБРИКИ

УДК 930(092):69

*БОЙКО ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ, докт. ист. наук, профессор,  
vpbojko@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*БОЙКО ОЛЬГА ЕВГЕНЬЕВНА, ст. преподаватель,  
vpbojko@yandex.ru*

*Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 49*

### **ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ С.П. ТИМОШЕНКО И ЕГО ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Статья посвящена научно-педагогической деятельности выдающегося ученого Степана Прокофьевича Тимошенко, который, получив образование в России, стал профессором Киевского, а затем Петербургского политехнического институтов. После эмиграции он основал школы прикладной механики в Белграде (Югославия), а затем в Мичиганском и Стэнфордском университетах (США), став всемирно признанным ученым, оказавшим влияние на формирование мировой и отечественной науки.

**Ключевые слова:** прикладная механика; инженерно-строительное образование.

*VLADIMIR P. BOIKO, DSc, Professor,  
vpbojko@yandex.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

*OL'GA E. BOIKO, Senior Lecturer,  
vpbojko@yandex.ru*

*Tomsk State University,  
49, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

### **STEPHEN TIMOSHENKO, OUTSTANDING SCIENTIST AND HIS CONTRIBUTION TO CONSTRUCTION ENGINEERING EDUCATION**

The paper is devoted to Stephen Timoshenko and his academic activity. After graduating from Petersburg State Transport University he was assigned professor of Kiev Polytechnic University and later St.-Petersburg State Polytechnical University. After emigration,

Timoshenko founded the School of Applied Mechanics in Belgrade, Yugoslavia, and later at University of Michigan and Stanford University, USA. Timoshenko became the internationally recognized scientist who contributed much to formation of national and international science.

**Keywords:** applied mechanics; construction engineering education.

В конце Гражданской войны, как известно, число российских эмигрантов превысило два миллиона человек. Основную массу эмиграции «первой волны» составляли представители высших сословий Российской империи, которым нужно было опасаться беспощадной классово-борьбы, провозглашенной победителями-большевиками основным принципом своей внутренней политики. Однако состояла она и из людей простого звания, крестьян и рабочих, служивших в белой армии, бывших студентов и гимназистов, волей случая получивших возможность эмигрировать. Особую группу составляли представители творческой и научной интеллигенции, которые, оставив родину, стали широко известны миру. Одним из них являлся молодой профессор ряда российских технических вузов С.П. Тимошенко.

Своей главной целью авторы статьи считают подчеркнуть в биографии этого незаурядного во всех отношениях человека такие моменты, как получение им базового образования в дореволюционной России и продвижение его на этой основе в ведущих университетах мира, сначала в Европе, а затем и в Северной Америке.

Степан Прокофьевич Тимошенко (1878–1972) – всемирно известный ученый в области прикладной механики, член нескольких национальных академий, иностранный член АН СССР, почетный профессор многих крупнейших университетов мира. Свою научную деятельность, связанную, в основном, с расчетами на прочность, постоянно совмещал с преподаванием в разных высших учебных заведениях России, а затем Европы и Америки. В предисловии к работе С.П. Тимошенко «Инженерное образование в России», изданной в 1993 г., член-корреспондент РАН В.Н. Луканин писал: «Большинство работ С.П. Тимошенко было вызвано практикой расчетов новых конструкций, и разработанные им методы во многом способствовали их совершенствованию. Тимошенко первым среди инженеров понял значение методов, которые получили название энергетических. Если можно так выразиться, “под знаком” этих методов прошло развитие механики всего XX века» [1, с. 3]. С.П. Тимошенко был автором многочисленных работ, изданных в России и за рубежом, в основном в США, которые позволяют отнести его к числу выдающихся отечественных ученых-механиков, обогативших мировую науку исследованиями первостепенного значения [2, с. 9]. Истоки его достижений, как это часто бывает, корнями уходят в детство и юность, когда закладывается фундамент личности с ее волевыми, ментальными и эстетическими характеристиками.

Как пишет в своих воспоминаниях С.П. Тимошенко, его отец, Прокофий Тимофеевич, родился в 1847 г. в хате крепостного крестьянина, принадлежавшего помещику Степану Кандыбе: «Помещик женился на своей крепостной, старшей сестре моего отца, и отец был взят в помещичий дом, где воспитывался с детьми помещика, т. е. племянниками и племянницами. По-

мещик был довольно состоятельным, но рано умер, и его вдова осталась с пятью малыми детьми». Вследствие больших перемен (отмена крепостного права) многие помещики разорились, в их числе был и Кандыба, и тогда Прокофий вместе со старшим сыном помещика, своим племянником Владимиром, решили получить образование, которое могло давать средства к существованию. Они отправились в Харьков на только что открытые курсы для подготовки землемеров. Кончили их успешно и примерно с 20-летнего возраста начали самостоятельно работать как землемеры [3, с. 13].

В первые пореформенные годы и десятилетия землемеры выполняли большую и сложную работу, нередко выступая посредниками между обиженными крестьянами и помещиками. Многие бывшие крепостные получали наделы намного меньше и хуже, чем те, которыми они пользовались до реформы. Например, в Конотопском уезде, по сведениям уездного статистика А.М. Лазоревского, у крестьян отрезали 40 % земли. К тому же выкупная цена земли превышала ее рыночную стоимость в два раза. «Крестьяне отказывались брать землю, требуя ее бесплатной передачи без уплаты бесчисленных налогов, проводили выпасы своего скота на помещичьих полях и сенокосах» [Цит. по: 2, с. 15].

В таких условиях землемер мог многое сделать для защиты интересов крестьян, и Прокофий Тимофеевич своей принципиальностью и доброжелательностью заслужил уважение в Конотопском уезде. В случае споров о наделах и границах крестьяне не обращались в суд, а шли к П.Т. Тимошенко, и его слово нередко было решающим. Через много лет С.П. Тимошенко приходилось проезжать с отцом по селам, где он в молодости работал, и всюду крестьяне узнавали бывшего землемера и встречали его с уважением. Добавим, что у отца выдающийся ученый научился демократизму, уважению к простым людям, и эти качества переросли затем в симпатию к народничеству и либерализму как политическим течениям.

В 1876 г. П.Т. Тимошенко женился на Юзефине Яковлевне Сарнавской (1854–1922) – дочери отставного военного, который управлял имением магнатов Браницких около Киева. Она окончила женскую гимназию в Киеве, что по тем временам было довольно редко для женщины. После женитьбы Прокофию Тимофеевичу пришлось прекратить связанную с постоянными поездками работу землемера. Он взял в аренду кандыбовское имение в Шпотовке и начал вести там собственное хозяйство. Именно там 23 декабря 1878 г. в семье Тимошенко родился сын Степан, которого, вероятно, назвали в честь Степана Кандыбы, много сделавшего для того, чтобы отец С.П. Тимошенко «выбился в люди». Если от отца он взял крестьянскую основательность во всех своих делах, тягу к знаниям и богатырское здоровье, то от матери получил благородные черты лица, дворянско-шляхетскую стройность фигуры, сохранил до глубокой старости спортивную подтянутость.

Так как Прокофий Тимофеевич был постоянно занят хозяйственными делами, детей воспитывала в основном мать. Она очень любила читать и привила им любовь к чтению. Большое впечатление на мальчика Стёпу произвело путешествие осенью в Киев сначала на лошадях до Конотопа, а затем по железной дороге до Киева. Возвратившись в свое имение, он строил железные дороги на

куче песка, а затем, когда подросток, мечтал стать инженером. С пяти лет для мальчика начались занятия: сначала его учила грамотности и началам арифметики мать, летом ей помогали две ее подруги, профессиональные учительницы, приезжавшие погостить. В 1886 г. к нему из Киева привезли учительницу, которую через год сменил талантливый и опытный педагог, выпускник Роменского реального училища М.М. Коваленко, сумевший заинтересовать Степана учебными предметами и подготовить его к поступлению сразу в первый класс (без подготовительного класса) в это же училище [2, с. 18].

С первых дней учебы Степан подружился со спокойным и задумчивым мальчиком, который сидел за соседней партой. Звали его Абрам Иоффе, он хорошо учился и, как правило, не принимал участия в шумных, а потом и буйных играх и развлечениях своих одноклассников. Но у обоих друзей были и чисто мальчишеские забавы. В младших классах они нередко пробовали силу друг друга, борясь на зеленых лугах, соревнуясь, кто кого дальше пронесет на спине. С.П. Тимошенко вспоминал, что более крепкому и сильному Иоффе это удавалось лучше. Выдающийся физик, академик, лауреат многих премий Абрам Федорович Иоффе стал широко известен народным массам, далеким от науки, после выхода в свет замечательной песни В. Высоцкого «Утренняя гимнастика», где, в частности, были слова: «Главный академик Йоффе утверждал коньяк и кофе...»

Уже в училище у С.П. Тимошенко проявился талант педагога. Ему нравилось разъяснять другим всякие математические премудрости. Он рано приходил в училище, чтобы иметь время для помощи своим товарищам, которым математика давалась труднее. «Для меня, – писал позже С.П. Тимошенко, – давать объяснения, повторять доказательства теорем – было настоящим наслаждением. Думаю, мне суждено было стать учителем. Если я успел сделать это в жизни, то потому, что занимался тем, что мне нравилось, к чему меня тянуло» [2, с. 30]. В мае 1896 г. закончились выпускные экзамены в Роменском реальном училище, и 17-летний юноша отправился в свое небольшое имение, чтобы готовиться к вступительным экзаменам в Институт инженеров путей сообщения в Петербурге.

В сентябре 1896 г. Степан Тимошенко успешно сдал все экзамены в этот институт, а их было немало, да и конкурс здесь был немалый – на 150 мест претендовало 700 человек. Молодой абитуриент все сдал на «отлично» (арифметику, алгебру, геометрию), сочинение по русской словесности написал на 4, по тригонометрии получил  $4\frac{3}{4}$  балла, успешно сдал и дополнительные (внеконкурсные) экзамены по рисованию и иностранному языку. В результате он оказался в четвертом десятке поступивших в институт студентов, что для выпускника провинциального реального училища было большим успехом [2, с. 31]. На первом курсе студент Тимошенко должен был изучать высшую математику (5 лекций в неделю), физику (2 лекции) химию (3), основы механики и статики (2), строительное дело (1), геодезию (3), начертательную геометрию (2) и одну лекцию в неделю по богословию [5, с. 73–74]. Надо сказать, что математическая подготовка будущих инженеров путей сообщения была не ниже, а то и выше студентов физико-математического факультета в Петербургском классическом университете.

После окончания Института путей сообщения С.П. Тимошенко начал работать лаборантом в механической лаборатории Путейского института, основанной в 1852 г. С 1873 г. ею руководил талантливый инженер-практик и видный теоретик механики Н.А. Белелюбский (1845–1922), автор проектов десятков мостов и других важных сооружений. В его лаборатории, оборудованной новейшими приборами, проводились широкие исследования камня, цемента и металла почти всех железнодорожных и городских мостов. Тут же осуществлялся контроль сварного и литого железа, рельсов и бандажей, бетона и железобетона, дерева, проводились испытания камня на замораживание и другие, необходимые для контроля за прочностью объектов работы. Как отмечали авторы очерков о деятелях отечественной науки, «можно лишь удивляться энергии Н.А. Белелюбского, с которой он удовлетворял многочисленные запросы строительства на исследование разнообразных материалов. Благодаря работе Белелюбского лаборатория превратилась в исследовательскую станцию, которая заняла видное место среди подобных лабораторий за границей» [6, с. 318]. Лаборант в те времена получал не такие уж малые деньги – сто рублей в месяц (двойная зарплата квалифицированного рабочего), что позволило С.П. Тимошенко снять в Петербурге трехкомнатную квартиру, где в одной комнате проживали два его брата-студента, в другой жил он сам с молодой женой, студенткой высших женских курсов, а третья была общей, где они обедали и общались. Трудно себе представить, чтобы в советское или нынешнее время лаборант мог позволить себе такую вполне обеспеченную жизнь.

В лаборатории Тимошенко было поручено заниматься испытанием цемента. Заказчиками были почти все цементные заводы России. Однако его вскоре заинтересовали испытания рельсов, и он принял участие в исследовании рельсовой стали на твердость, а также ее прочности на растяжение. Эта работа усилила тягу молодого инженера к исследовательской деятельности, и он хорошо понимал, что ему необходимы основательные знания по математике и механике. Для этого он стал посещать лекции профессоров В.И. Станевича и К.Б. Бобылева. Эти лекции были не обязательны для студентов и преподавателей, и в итоге Тимошенко стал едва ли не единственным слушателем, который не только присутствовал, но и прорабатывал рекомендованную лекторами литературу, чтобы самому докопаться до истины. Первым, кто указал на применение теории в практической деятельности, был выдающийся математик, механик и кораблестроитель А.Н. Крылов, лекции которого С.П. Тимошенко слушал в Российском физико-химическом обществе. Реализовать свои возможности он смог в Петербургском политехническом университете, который открылся в 1899 г. по инициативе министра финансов С.Ю. Витте, выдающегося политического деятеля рубежа XIX и XX веков. Велика его роль в открытии Томского технологического института. Именно по его инициативе на строительство корпусов и оснащение их необходимым оборудованием были привлечены средства, предназначенные для создания очередного броненосца. Так был открыт первый за Уралом технический вуз.

В Петербургский политехнический институт из Путейского института перешли некоторые профессора, прежде всего С.И. Дружинин. Они привели за собой своих учеников и помощников, в числе которых был и С.П. Тимо-

шенко. Здесь стали внедряться новейшие методы работы со студентами: впервые начали проводиться лабораторные занятия, позволявшие проверять правильность теоретических положений курса сопротивления материалов, полученных выводов и результатов. Лабораторные эксперименты согласовывались по времени с чтением лекций и занятиями в небольших группах с расчетом, чтобы каждый студент мог систематически заниматься лабораторными предметами. Тимошенко сразу же стал рьяным сторонником новой системы и много сделал для ее усовершенствования и воплощения в жизнь. В Петербургском политехническом институте в 1901–1906 гг. произошло становление С.П. Тимошенко как ученого и педагога. Он существенно расширил и углубил свои знания по математике, механике, физике, изучил основополагающие труды зарубежных авторов, познакомился с выдающимися деятелями отечественной механики А.Н. Крыловым и В.Л. Кирпичевым, увлекся их блестящими идеями и установками, освоил богатейший опыт их научного творчества, который стал с успехом применять в Киевском политехническом университете.

8 января 1907 г. состоялась первая лекция молодого преподавателя, на которую собралось более 400 студентов всех инженерных специальностей. Как они потом отмечали, за кафедрой стоял высокий стройный человек с удлинённым симпатичным лицом, небольшими усиками и роскошным чубом, уже тронутым первой сединой. Через 55 лет после этого события С.П. Тимошенко вспоминал: «Конечно, я очень волновался, но так как я точно знал, что хочу сказать, и говорил самыми простыми короткими фразами, то студентам было легко следить за лекцией и они были удовлетворены. Голос мой тоже оказался подходящим, и я без напряжения мог охватить самые отдаленные ряды слушателей. Вскоре выяснилось, что лектор из меня неплохой и мои лекции стоит посещать. В вузах того времени это уже был немалый успех, поскольку студенты на лекции, как правило, не ходили, а старались освоить предмет по книжке» [Цит. по: 2, с. 82]. Не забывал С.П. Тимошенко и свой личный студенческий опыт, хорошо зная, что одних лекций мало для должного освоения предмета. Были необходимы и упражнения, чтобы показать применение теории на практике. Поэтому студенты Тимошенко были разделены на 4 группы, по 30 человек в каждой. Одну из них он вел лично, а другими занимались его помощники. Составленные им упражнения и практические задания стали потом основой учебника по сопротивлению материалов, многократно переиздававшегося впоследствии в России и за рубежом.

Однако не все так гладко складывалось у С.П. Тимошенко в Киевском политехническом институте, как это казалось на первый взгляд: первые научные статьи и, как нынче говорят, методические пособия и учебники, первые заграничные командировки и вполне обеспеченная жизнь, все это не могло изменить его либеральных убеждений, воспринятых в детстве от отца и школьных товарищей. Новый политический лидер Российской империи П.А. Столыпин при слабовольном царе Николае II проводил жесткий курс по искоренению кривоверных как в народе – переселение крестьян из Европейской России в Сибирь и на окраины, оставляя нетронутыми изжившие себя помещичьи имения, так и в отношении студенчества, отнимая у него прежние пре-

имущества и льготы. 11 января 1911 г. Столыпин утвердил циркуляр о запрещении всяких студенческих собраний и введении полицейского режима в вузах, что вызвало волну протеста среди студентов и части преподавателей. Сначала студенты Петербургского университета объявили забастовку, затем к ним присоединились студенты других вузов, в том числе и Киевского политехнического института.

Уже 30 января группа профессоров института выразила письменный протест против указа 11 января, который, по их мнению, может довести академическую жизнь до такого разрушения, «какого еще нигде и никогда не было». Под протестом подписалось 25 человек, в числе которых были С.П. Тимошенко и Е.О. Патон – будущее светило в области сварки металлов, президент Украинской академии наук. Естественно, правительство жестко отреагировало на такой шаг, и «подписанты», как их потом стали называть, были уволены. Надо ли говорить, что поднялась буря возмущения среди студентов и преподавателей института, – была написана петиция, где указывались заслуги уволенных профессоров и доцентов. В частности, о С.П. Тимошенко писали, он за три года работы в институте «довел преподавание теории упругости и сопротивления материалов до такого совершенства, о котором можно только мечтать. Под его руководством три выпуска приобрели блестящие познания в области его специальности, и из его лаборатории вышел целый ряд молодых ученых, с достоинством занимающих кафедры в других высших технических учебных заведениях». Однако власти упорствовали в своем заблуждении и не вняли этим горячим и справедливым призывам [2, с. 93, 94].

После увольнения из института за свои политические воззрения молодой талантливый и трудолюбивый ученый, а было ему тогда всего 32 года, приступил к изданию своего курса сопротивления материалов. Как писал он в своих воспоминаниях, никакие занятия его не отвлекали, и написание книги продвигалось быстро: «Манускрипт был закончен в мае 1911 года, и книга вышла из печати в августе того же года. К концу лета получилась и премия Журавского, что было очень кстати» [3, с. 117]. Д.И. Журавский (1821–1891) был выдающимся инженером-механиком и мостостроителем XIX века, который одним из первых подверг теоретическим расчетам проектирование и постройку деревянных мостов при строительстве железной дороги из Петербурга в Москву. Своими трудами он обогатил тогда современную ему теорию изгиба, лично руководил многими проектами и стройками в России [Подробнее см.: 7, с. 60–63].

Кроме медали имени Журавского полагалась премия в две с половиной тысячи рублей, а такой суммы Тимошенко еще в руках не держал – ежемесячное жалованье тратилось, как и у большинства преподавателей, без остатка, и вопроса о сбережении денег не существовало. Тем не менее пришлось такую сумму отнести в банк на Большой Морской, где она пролежала недолго – следующим летом семья молодого ученого отправилась за границу и благополучно их истратила. «Так закончилась моя первая и последняя операция в русских банках, – писал уже в 60-е годы 84-летний Степан Прокофьевич, – когда впоследствии большевистская власть захватила и национализировала банки, я ничего не потерял – сбережений у меня не было» [3, с. 118].

Вскоре С.П. Тимошенко нашел работу в Петербурге – стал консультантом по прочности военно-морских судостроительных заводов, был членом комиссии при Управлении военно-воздушного флота по реконструкции аэропланов во время Первой мировой войны, экспертом по строительной механике при Военно-инженерном совете. Согласно его рекомендациям реконструируется верхнее строение железных дорог России из-за увеличения веса поездов в связи с потребностями войны. Продолжил он и педагогическую деятельность в Электротехническом институте, совершенствуя методику преподавания многих дисциплин. С.П. Тимошенко принадлежит пальма первенства в постановке преподавания таких важных предметов для инженера-проектировщика и инженера-строителя, как сопротивление материалов и теория упругости. Им созданы, как уже отмечалось выше, основополагающие учебники по этим дисциплинам, написаны работы по теории колебаний, теории устойчивости деформируемых систем, инженерной механике, прикладной динамике, теории сооружений, теории пластин и оболочек, истории науки о сопротивлении материалов.

Вопросы обучения студентов механике и ее различным разделам интересовали С.П. Тимошенко на протяжении всей его жизни. К чтению лекций он относился как к важному делу и основательно к ним готовился, писал текст и делал чертежи, что потом помогало быстро оформить их в учебники и пособия. Его лекции были ясными, четкими, насыщенными идеями и обширным фактическим материалом, поэтому собирали огромные аудитории студентов, слушателей, преподавателей. Семинарским занятиям он также уделял большое внимание, считая их существенным элементом подготовки инженерных и научных кадров. В ходе преподавания он давал объективные оценки вклада в науку различных исследователей. Тимошенко прекрасно знал историю отечественной и зарубежной науки о сопротивлении материалов, давал яркую характеристику достижений ученых, которые были иногда достаточно резкими, но справедливыми. Большое значение он придавал механическим лабораториям, где проводились практические исследования отдельных механических явлений. Такие лаборатории были организованы им в Петербургском, Киевском и Загребском политехнических институтах, в Мичиганском и Стэнфордском университетах. Так постепенно в России, а затем и в Америке образовались научные школы Тимошенко.

В разных местах их значимость определялась временем пребывания там С.П. Тимошенко. Например, в Загребе он жил в тяжелых материальных условиях – ютился с семьей в лабораторном помещении, получал небольшое жалованье и в то же время должен был читать лекции на хорватском языке, изучение которого в короткий срок потребовало больших усилий. Кроме этого, обеспечение лаборатории для опытов было недостаточно, хотя Тимошенко и старался это отставание сократить. Таким образом, в Загребе он поработал только два года, и о серьезной школе прикладной механики говорить было трудно. Другое дело Америка, где материальные условия для жизни и научного творчества были несравненно лучше.

Уже в первые дни пребывания в США Тимошенко обратил внимание на низкий уровень технического образования. Например, в Нью-Йорке прохо-

дившая по улицам городская наземная железная дорога поразила его своим инженерно безграмотным устройством. После некоторых раздумий он поступил на должность инженера в исследовательский институт компании «Вестингауз» в Питсбурге. Тимошенко встретил там нескольких инженеров, эмигрировавших из России, в числе которых был сын владимирского купца Владимир Козьмич Зворыкин, ставший впоследствии «отцом американского телевидения». В скором времени С.П. Тимошенко выдвинулся в число наиболее авторитетных специалистов исследовательского института, чему помогла основательная подготовка в математике и основных технических предметах [8, с. 121].

В 1927 г. С.П. Тимошенко получил приглашение перейти на работу в Мичиганский университет. Новая кафедра должна была готовить квалифицированных специалистов в области прикладной механики, что отвечало интересам ученого, и он переехал с семьей в г. Анн-Арбор. Став профессором Мичиганского университета, Тимошенко решил не ограничивать преподавательскую деятельность занятиями со студентами. Вместе с приглашенными им профессорами он организует летнюю школу для докторантов и дипломированных специалистов. Успех этой школы превзошел все ожидания – ежегодно сюда стали съезжаться десятки, а потом и сотни инженеров, желающих расширить свои знания в области прикладной механики. Многие из них старались затем остаться в Мичиганском университете на год, чтобы подготовиться под руководством русского профессора докторскую диссертацию.

В 1935 г. Тимошенко предложил организовать подобные школы еще в двух университетах – в Стэнфордском и Калифорнийском. После некоторого раздумья он принял предложение Стэнфордского университета и проработал там 18 лет. Расположенный в г. Пало-Альто штата Калифорния университет был достаточно удален от промышленных центров, что позволило С.П. Тимошенко освободиться от разного рода технических консультаций и сосредоточиться на преподавании в университетской инженерной школе, подготовке к печати новых и переиздании старых книг. Публикации приносили неплохой доход и умножали славу ученого, ставшего «отцом американской прикладной механики». На склоне жизни, подводя итоги, Тимошенко написал: «Теперь, через сорок лет, обдумывая причину наших достижений в Америке, я прихожу к заключению, что немалую роль в этом деле сыграло образование, которое дали нам русские высшие инженерные школы» [8, с. 126]. С.П. Тимошенко удалось в короткие сроки внести свой вклад в продвижение Америки на пути к великой научной державе в важной для ее промышленного развития компетенции. Дело в том, что он написал в эмиграции несколько учебников по своему предмету – теории упругости и строительной механике. Они и подняли уровень этой области в Америке на новую ступень, по ним до сих пор учатся американские (да и русские) студенты.

Отмечая несуразность многих инженерных сооружений, наблюдаемую им при первом посещении США в начале 20-х гг., ученый был убежден, что существенному изменению ситуации в развитии американской науки в области механики и ее применению в инженерном деле во многом способствовала его многолетняя научная деятельность в этой стране. Поэтому не случайно на

XII Международном конгрессе по теоретической и прикладной механике, проходившем в 1968 г. в Стэнфорде (США), подчеркивалось, что «до появления в Америке русского ученого С.П. Тимошенко настоящей науки по механике деформируемого твердого тела в США не было» [2, с. 9].

Большой интерес научной общественности к личности С.П. Тимошенко вызван, прежде всего, его огромным вкладом в мировую науку по механике, его природными дарованиями, целеустремленностью и феноменальной работоспособностью. Так, в Мичиганском университете за 9 лет работы было опубликовано несколько фундаментальных работ: в 1930 г. вышло в свет его двухтомное издание «Соппротивление материалов», в 1933 г. – «Теория упругости». В Стэнфордском университете С.П. Тимошенко также выпустил ряд основательных монографий, таких как «Теория пластин и оболочек» (1940), «Статика сооружений» (1945), «Высшая динамика» (1948). В 1953 г. Тимошенко издал свой последний капитальный труд «История сопротивления материалов», в котором осветил развитие этой фундаментальной инженерной науки, начиная с творений Леонардо да Винчи и Галилео Галилея до открытий середины XX в. Эта книга имела успех во всем мире, в том числе в СССР, где была переведена на русский язык и издана 15-тысячным тиражом, раскупленным в течение трех месяцев [2, с. 11]. В 1959 г. вышла небольшая брошюра «Инженерное образование в России», написанная после посещения СССР. Поражает незаурядная эрудиция автора этого труда в характеристике как дореволюционной истории образования, так и советской системы подготовки инженерных кадров. Автор отдает должное профессионализму советских преподавателей, высокой квалификации студентов при написании ими курсовых работ и дипломных проектов в стенах Киевского политехнического института, где он когда-то преподавал. Вместе с тем его поражало устаревшее оборудование лабораторий, прослуживших по полвека и более, и не было никакой надежды на их быструю смену. Советских преподавателей поражала энергия 80-летнего С.П. Тимошенко, его живой и острый ум, высочайшая эрудиция и профессионализм [1].

Деятельность С.П. Тимошенко получила широкое признание во всем мире. Он был почетным членом нескольких академий, университеты и технические вузы многих стран мира присудили ему почетные докторские звания. Многие его научные работы отмечены медалями и премиями, как, впрочем, и вся его научно-педагогическая деятельность. В 1935 г. С.П. Тимошенко был награжден Американским обществом инженеров-механиков медалью им. В.Р. Варнера за достижения в области механики. В 1939 г. за заслуги в инженерном образовании Американское общество инженерного образования наградило ученого медалью им. Ламе. За работу по подвесным мостам Институт Франклина отметил С.П. Тимошенко медалью Левери, а Французское общество докторов-инженеров наградило его большой медалью. В 1947 г. Тимошенко за заслуги перед инженерной наукой получил международную медаль им. Джеймса Уатта, выдаваемую каждые пять лет наиболее выдающемуся инженеру. В 1957 г. Американское общество инженеров-механиков учредило медаль им. С.П. Тимошенко, и он стал первым лауреатом «за неопенимый вклад и личный пример его как руководителя новой эры в прикладной механике».

Таков далеко не полный перечень знаков мирового признания заслуг С.П. Тимошенко как крупнейшего ученого-механика XX в., обогатившего науку работами первостепенного значения и вписавшего свое имя в золотой фонд современного технического прогресса.

Как отмечал впоследствии известный ученый-механик Э.И. Григолюк, «огромные достижения С.П. Тимошенко в области преподавания оказались возможными потому, что он был творчески активным человеком, ученым с ясным складом ума, с возможностями глубокого анализа и широкого обобщения. Его научное мышление и образование оформилось под влиянием замечательных достижений в области механики великих ученых Д.И. Журавского, Ф.С. Ясинского, В.Л. Кирпичева, И.Г. Бубнова, А.Н. Крылова, Н.П. Петрова, А.В. Гадолина. Умение отделять главное от второстепенного, способность найти механическую причину явления и объяснить это явление с помощью простых математических средств – эти важные черты научного творчества С.П. Тимошенко сделали основные результаты его деятельности классическими» [4, с. 4].

Можно сказать, что наша наука – это наше национальное богатство. Недавнее прошлое показывает, что государство относилось к нему потребительски, считая, что это богатство не иссякнет и на место уехавших за рубеж ученых придут новые, лучшие кадры. Однако, подпитывая зарубежную, прежде всего американскую науку, надо понимать, от какого наследства мы отказываемся. На иностранной почве выросли лидеры мировой науки в разных ее отраслях, лауреаты различных, в том числе Нобелевских премий, создатели авторитетных научных школ, которые, тем не менее, не забывали своей родины и охотно делились с российскими коллегами знаниями, давали мудрые советы, как выйти из тупика. Однако советы, данные в конце XX – начале XXI века, к сожалению, большей частью остались невостребованными, о чем говорили они в своих выступлениях, опубликованных в сборнике Российской академии наук [8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тимошенко, С.П.* Инженерное образование в России / С.П. Тимошенко ; под. ред. член-корр. РААСН Н.Н. Шапошникова ; пер. с англ. В.И. Иванова-Дятлова. – Люберцы : Производственно-издательский комбинат ВИНТИ, 1997. – 60 с.
2. *Писаренко, Г.С.* Степан Прокофьевич Тимошенко / Г.С. Писаренко. – М. : Наука, 1991. – 240 с.
3. *Тимошенко, С.П.* Воспоминания / С.П. Тимошенко. – Киев : Наукова думка, 1993. – 424 с.
4. *Григолюк, Э.И.* Степан Прокофьевич Тимошенко (1878–1972) / Э.И. Григолюк // Институт механики МГУ. Научные труды. № 47. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1977. – С. 3–14.
5. *Житков, С.М.* Институт инженеров путей сообщения. Ист. очерк / С.М. Житков. – СПб., 1899. – 364 с.
6. *Люди русской науки.* Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. – М. : Наука, 1965. – 462 с.
7. *Исторические очерки строительства дорог и мостов / В.П. Бойко, В.Н. Ефименко [и др.].* – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2012. – 150 с.
8. *Борисов, В.П.* Америка мне определенно не нравилась / В.П. Борисов // Российская научная эмиграция: двадцать портретов. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – С. 112–134.

## REFERENCES

1. *Timoshenko, S.P.* Engineering Education in Russia. Ed. member-corr. N.N. Shaposhnikov. Lyubertsy : VINITI, 1997. 60 p. (transl. from Engl. by V.I. Ivanov-Dyatlov)
2. *Pisarenko, G.S.* Stepan Prokofevich Timoshenko [Stephen Timoshenko]. Moscow : Nauka, 1991. 240 p. (rus)
3. *Timoshenko, S.P.* Vospominaniya [Memories]. Kiev : Naukova Dumka Publ., 1993. 424 p. (rus)
4. *Grigolyuk, E.I.* Stepan Prokofevich Timoshenko (1878–1972) [Stephen Timoshenko (1878–1972)]. Moscow : Moscow State University Publ., 1977. Pp. 3–14. (rus)
5. *Zhitkov, S.M.* Institut inzhenerov putei soobshcheniya [Petersburg State Transport University]. St.-Petersburg, 1899. 364 p. (rus)
6. *Lyudi russkoi nauki* [People of Russian science]. Ocherki o vydayushchikhsya deyatelyakh estestvoznaniya i tekhniki. Moscow : Nauka, 1965. 462 p. (rus)
7. *Boiko, V.P., Efimenko, V.N., et al.* Istoricheskie ocherki stroitel'stva dorog i mostov [Historical essays on bridge and road construction]. Tomsk : TSUAB Publishing House, 2012. 150 p. (rus)
8. *Borisov, V.P.* Amerika mne opredelenno ne нравilas' [I did not like America]. Rossiiskaya nauchnaya emigratsiya: dvadtsat' portretov. Moscow : Editorial URSS, 2001. Pp. 112–134. (rus)

## ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ

Статья и сопроводительные документы в электронном виде, оформленные с использованием редактора Microsoft Word для Windows версии Word 97/2010, высылаются в редакцию по электронной почте [vestnik\\_tgasu@tsuab.ru](mailto:vestnik_tgasu@tsuab.ru), а оригиналы в бумажном виде и на диске по почте по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ТГАСУ, издательство ТГАСУ. Маркировка диска или файлов должна содержать Ф.И.О. автора и название статьи.

Статья обязательно сопровождается рецензией специалиста, имеющего ученую степень в данной области, экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, авторской справкой, сопроводительным письмом и авторским договором. Формы документов и примеры их оформления можно посмотреть во вкладках на странице «Вестник ТГАСУ» на сайте [www.tsuab.ru](http://www.tsuab.ru). Документы и авторский оригинал статьи в электронном и бумажном виде (в двух экземплярах), заверенные подписями и печатью, должны поступить в редакцию на рассмотрение не позднее чем за 3 месяца до месяца публикации.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят обязательное рецензирование в соответствии с требованиями ВАК РФ. Редколлегия оставляет за собой право отклонить статью или вернуть её на доработку. Принадлежность и объем авторских прав на публикуемые в журнале материалы определяются Авторским договором и действующим законодательством Российской Федерации.

Авторское вознаграждение авторам не выплачивается. Плата за публикацию статей не взимается.

Рукописи статей и электронные копии авторам не возвращаются. В случае поступления в редакцию материалов, не соответствующих изложенным выше требованиям, статья к рассмотрению не принимается.

Статья будет рассмотрена редакционной коллегией и рецензентами только при условии ее соответствия нижеприведенным требованиям:

Объем статьи не должен превышать 10 печатных страниц формата А4, включая иллюстрации, библиографию и сведения об авторах.

Содержание файлов на диске должно быть идентично распечатанному варианту.

Текст должен быть набран через один интервал, шрифт – Times New Roman, размер шрифта №11, цвет – «Авто» (черный).

Масштаб – 100 %. Смещение и креннинг отсутствуют. Анимация не используется.

Параметры страницы: левое поле – 2 см, правое поле – 5,9 см, верхнее поле – 3,5 см, нижнее поле – 5,5 см. Расстояние от края до верхнего колонтитула – 2,5 см; до нижнего – 1,5 см.

При наличии в тексте таблиц, рисунков и формул на них должна быть ссылка.

Рисунки и таблицы должны иметь заголовки, размещаемые над таблицей и под рисунком соответственно. Рисунки, таблицы и подписи к ним вставляются в текст. Кроме того, рисунки, выполненные в любом графическом редакторе, присылаются отдельным файлом в одном из графических форматов: GIF, JPEG, PNG.

Формулы должны быть набраны только в редакторе формул Word 97/2010 (MS Equation 3.0) или в MathType 6.

При наборе текста статьи следует избегать более двух знаков пробела подряд, использования переноса слов в заголовках.

Публикация начинается индексом УДК, напечатанным в левом верхнем углу прописными (заглавными) буквами.

Ф.И.О. автора (или авторов) должны быть напечатаны в левом верхнем углу прописными (заглавными) буквами после индекса УДК, с перечислением научной степени и звания строчными буквами, а также адрес электронной почты каждого автора и название организации, от имени которой подается статья.

Название статьи выровнено по левому краю строки и напечатано прописными (заглавными) буквами.

После названия публикации приводится аннотация объемом до 0,25 страницы (не менее 500 знаков), где излагается основное содержание статьи с описанием проблематики, методов и результатов исследований.

После аннотации приводятся ключевые слова, отражающие основные понятия статьи и актуальность исследований.

После ключевых слов дублируются на английском языке Ф.И.О. автора (или авторов) с перечислением научной степени и звания строчными буквами, а также адрес электронной почты каждого автора и название организации, название статьи, аннотация и ключевые слова.

При печати использовать стандартные отступы первых строк и оформление абзацев редактором Word.

Статья обязательно должна содержать ссылки на весь библиографический список, который приводится в конце статьи в порядке упоминания. Ссылки в тексте на цитируемую литературу даются в квадратных скобках. Рекомендуется в библиографическом списке привести не менее 10 ссылок на научные статьи, в первую очередь, опубликованные за последние 5 лет в рецензируемых научных журналах. Ссылка на источник, опубликованный в электронной форме в сети Интернет, должна включать Ф.И.О. авторов, название статьи и название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта и дату обращения к электронному ресурсу.

Библиографический список приводится в конце статьи отдельно на русском языке и в транслитерации на латинице и переводе на английский язык. При этом для русскоязычных источников в транслитерации на латинице приводятся Ф.И.О. авторов, названия статей, журналов и материалов конференций и на английском языке – названия статей, названия журналов и материалов конференций и выходные сведения. Курсивом выделяются только названия книг, сборников статей, материалов конференций и журналов в транслитерации на латиницу. Для транслитерации на латиницу следует использовать Интернет-ресурсы, например сайт [Translit.ru](http://Translit.ru) (выбрать систему транслитерации BGN).

На бумажных вариантах статей (2 экземпляра) должны быть подписи авторов и научного руководителя (для аспирантов).

Сведения об авторах должны содержать: Ф.И.О. (полностью), ученую степень и звание, место работы, должность, телефон и электронную почту.

Пример оформления статьи приведен во вкладке на странице «Вестник ТГАСУ» на сайте [www.tsuab.ru](http://www.tsuab.ru).

Редакционная коллегия будет признательна авторам, если для экспертной оценки представленной статьи в нее будет включена краткая формулировка, суммирующая значимость полученных результатов по соответствующему научному направлению в разделе «Выводы» или «Заключение».

Авторы в течение 1–2 дней получают уведомление о принятой статье. В случае несоответствия требованиям статья может быть возвращена на доработку. По всем вопросам, связанным с публикацией статей, можно обращаться к зам. главного редактора журнала по электронной почте: [ANOV@tsuab.ru](mailto:ANOV@tsuab.ru) или по телефону (382-2) 65-24-01 и 65-37-61.

Рассылка журнала «Вестник ТГАСУ» производится по подписке. Стоимость подписки на полугодие 600 рублей. Почтовый индекс издания 20424. Подписка осуществляется в почтовых отделениях по Объединенному каталогу «Пресса России» ЗАО «Агентство подписки и розницы».

## Внимание, подписка!

Выписать «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» на 2013 г. можно в любом отделении связи. Подписной индекс издания в *Объединенном Каталоге «Пресса России»* **20424**

Федеральное государственное унитарное предприятие "ПОЧТА РОССИИ" Ф СП-1  
Бланк заказа периодических изданий

Ф. СП-1

<b>АБОНЕМЕНТ</b> на		<del>газету</del> журнал	<b>20424</b>								
		(индекс издания)									
<b>Вестник ТГАСУ</b>											
(Наименование издания)		Количество комплектов									
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда	(почтовый индекс)		(адрес)								
Кому			(фамилия, инициалы)								

						<b>ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА</b>					
		ли-тер		<del>газету</del> журнал		<b>20424</b>					
		место				(индекс издания)					
<b>Вестник ТГАСУ</b>											
Стои-мость	подписки				Количество комплектов						
	пере-адресовки		_____ руб. _____ коп.								
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда	(почтовый индекс)		(адрес)								
Кому			(фамилия, инициалы)								