

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**  
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**Том 1  
выпуск**

**1  
2020**

**VOL. 1  
ISSUE 1**

*ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА*

# ***УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ***

*НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*

*Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год*

***Том 1  
Вып. 1***

***Ярославль 2020***

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор: С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)

Заместители главного редактора: А.А. ИГНАТЬЕВ (к.т.н., доц., Ярославль)  
П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)

Ответственный секретарь: Е.С. ЕГОРОВ

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (ученый секретарь Президиума РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Курск), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, к.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург, Россия), В.Е. РУМЯНЦЕВА (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИИ (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (д.т.н., проф., Иваново), Г.А. ФОМЕНКО (акад. РАЕН, д.г.н., проф., Ярославль), Е.М. ЧЕРНЫШОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Воронеж), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»

Адрес редакции 150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88

Телефон +7 (4852) 44-03-67

E-mail [ignatyeva@ystu.ru](mailto:ignatyeva@ystu.ru)

Электронный адрес <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редактор: М.А. Канакотина

Англ. перевод: Л.А. Тюкина

Компьютерная верстка: Е.С. Егоров

Корректор: О.А. Юрасова

Зарегистрирован 27 Ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)

Периодичность: 4 раза в год

Подписка и распространение Свободный доступ

*YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY*

***SMART COMPOSITE  
IN CONSTRUCTION***

*SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL*

*Established in November 2020, published quarterly*

***Volume 1  
Issue 1***

***Yaroslavl 2020***

# SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

## EDITORIAL BOARD

<i>Editor-in-Chief:</i>	<i>S.V. FEDOSOV (Acad. RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow)</i>
<i>Deputy Editors-in-Chief:</i>	<i>A.A. IGNATIEV (c.en.s., doc., Yaroslavl)</i> <i>P.B. RAZGOVOROV (d.en.s, prof., Yaroslavl)</i>
<i>Executive secretary:</i>	<i>E.S. EGOROV</i>

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

*A.A. ABDYKALYKOV (d.en.s., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), V.V. BELOV (adv. RAACS, d.en.s, prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKIY (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), N.I. Vatin (adv. RAACS, d.en.s., prof., Saint-Petersburg, Russia), V.M. GOTOVTSEV (d.en.s, prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, c. arch., prof. Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (d. physic. and math. sciences, prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, d.en.c, prof., Kursk), V.G. KOTLOV (adv. RACS, c.en.s, prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (c.arch, prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (d.en.s., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, d.en.s, prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, d.en.s., prof., Moscow), P.I. POSPELOV (d.en.s, prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, d.en.s, prof., Saint-Petersburg, Russia), V.E. RUMYANTSEVA (adv. RAACS, d.en.s., prof., Ivanovo), V.P. SELYAEV (acad. RAACS, d.en.s., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (d.en.s., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, d.en.s., prof. Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (d.en.s., prof., Ivanovo), G.A. FOMENKO (acad. RANS, d.geogr.s, prof., Yaroslavl), E. M. CHERNYSHOV (acad. RAACS, d.en.s., prof., Voronezh), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD en.s., prof., Serbia, Belgrade)*

<i>Founder:</i>	<i>Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education "Yaroslavl State Technical University"</i>
<i>Editorial office address</i>	<i>88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia</i>
<i>Telephone</i>	<i>+7 (4852) 44-03-67</i>
<i>E-mail</i>	<i>ignatyevaa@ystu.ru</i>
<i>Website</i>	<i><a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a></i>

*Published with the assistance of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*

<i>Editor:</i>	<i>M.A. Kanakotina</i>
<i>English translator:</i>	<i>L.A. Tyukina</i>
<i>Layout designer:</i>	<i>E.S. Egorov</i>
<i>Proofreader:</i>	<i>O.A. Yurasova</i>
<i>Registration</i>	<i>27 November 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)</i>
<i>Frequency:</i>	<i>Quarterly</i>
<i>Subscription and distribution</i>	<i>Open Access</i>



## ОБРАЩЕНИЕ РУКОВОДИТЕЛЯ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА К ЧИТАТЕЛЯМ



*Уважаемые коллеги!*

*Поздравляю с выходом в свет первого номера журнала «Умные композиты в строительстве»!*

*Изучение вопросов повышения качества строительных работ, улучшения городской среды, разработки современных подходов к созданию гражданских и промышленных объектов – насущное требование времени. Уверена, что выход издания станет адекватным ответом на такие запросы и знаковым событием в научном мире, занятом исследованиями строительных материалов и технологий, архитектуры и градообразования.*

*Выражаю надежду, что журнал «Умные композиты в строительстве» объединит усилия специалистов строительной и архитектурной школ ЯГТУ, ведущих ученых Российской Академии архитектуры и строительных наук, занимающихся разработкой новых технологий, коллег, представляющих другие российские академии и университеты, и экспертов из других стран.*

*Мы готовы стать площадкой обмена мнениями и демонстрации лучших инноваций.*

*Мы открыты к сотрудничеству!*

*Желаю новому научному изданию процветания, успехов, новых открытий и свершений!*

*И.о. ректора*

*Елена Степанова*



## ОБРАЩЕНИЕ ДЕПАРТАМЕНТА СТРОИТЕЛЬСТВА ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ К ЧИТАТЕЛЯМ



*Уважаемые читатели!*

*Важнейшей составляющей, позволяющей успешно решать вопросы по национальным проектам, является выстраивание четкой взаимосвязи между учеными и практиками. Практико-ориентированный подход позволит определить перспективные векторы развития современного строительства, установить полезные контакты между партнерами, а главное – качественно повысить уровень подготовки будущих специалистов. Несомненно, новые технологии должны оперативно внедряться в работу строительных организаций и предприятий, а специалисты – уметь максимально эффективно применять их в работе. Именно при таком взаимодействии все задачи, поставленные перед нами в рамках национальных проектов, будут качественно реализованы.*

*Благодаря новому журналу «Умные композиты в строительстве» у работников строительной отрасли и архитекторов Ярославской и других областей России, преподавателей, научных работников и студентов профильных вузов как в нашей стране, так и за рубежом появляется возможность узнать о последних достижениях в области создания стройматериалов, технологий, инженерных конструкций, обсудить на его страницах актуальные темы проектирования зданий, ландшафтного дизайна.*

*Желаю корреспондентам журнала неустанного творческого поиска, увенчанного ярким и качественным результатом! Уверен, энтузиазм и вера в свои силы помогут нам осуществить все планы, вывести сферы строительства и архитектуры на более высокий уровень.*

*Директор департамента строительства  
Ярославской области*

*Виктор Жучков*



## ОБРАЩЕНИЕ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА К ЧИТАТЕЛЯМ



**П.Б. Разговоров**  
Заместитель  
главного редактора



**С.В. Федосов**  
Главный редактор



**А.А. Игнатъев**  
Заместитель  
главного редактора

*Дорогие читатели!*

*Перед Вами первый номер научно-технического журнала «Умные композиты в строительстве» / «Smart Composite in Construction». Это название журнал получил в честь динамично развивающейся отрасли материаловедения, изучающей уникальное свойство «памяти» материалов и функциональные их возможности, нередко выходящие за рамки традиционных.*

*Всем хорошо известно, какими темпами сегодня возрастают объемы строительства. Это ставит перед научными сообществами амбициозные задачи в части разработки «умных» композитов, способных, с одной стороны, «считывать» изменения внешней среды, а с другой стороны – обладающих повышенной экономичностью. Ярким примером таких композитов являются прозрачные самоуплотняющиеся бетоны, которые находят все большее распространение в различных отраслях промышленности.*

*Мы искренне надеемся, что новый журнал найдет своего благодарного читателя, окажется полезным не только академическим работникам университетов, но и будет популярным среди практиков промышленных предприятий, инженерно-строительных и архитектурных организаций.*

*академик РААСН, д.т.н., профессор Сергей Федосов*

*к.т.н., доцент Алексей Игнатъев*

*д.т.н., профессор Павел Разговоров*





## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Обращение руководителя Ярославского государственного технического университета к читателям.....</i>	5
<i>Обращение департамента строительства Ярославской области к читателям.....</i>	6
<i>Обращение редакционного совета к читателям.....</i>	7
<i>П.Б. Разговоров, А.А. Игнатъев, М.А. Абрамов, Р.С. Нагорнов Переработка алюмосиликатного сырья и отвалов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред .....</i>	10
<i>Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева, Д.А. Артамонов Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях умеренно-континентального климата .....</i>	27
<i>A.L. Balushkin Assessment of the bearing capacity of elements of reinforced concrete floors with regard to adaptation to special effects .....</i>	36
<i>А.А. Ignatyev, V.M. Gotovtsev Transformation of a disturbed sitting drop .....</i>	39
<i>С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, С.А. Логинова Особенности биодеградации гидротехнических бетонов .....</i>	45
<i>М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, С.Н. Черпицкий, А.Б. Капранова Система контроля качества сыпучей смеси в барабанном устройстве непрерывного действия.....</i>	56
<i>V.Yu. Verbin, V.M. Dudin Selection of technology for highway road surface overhaul .....</i>	65
<i>А.В. Захаров, Н. А. Исаева, М.Ю. Покровская Проблемы пространственной организации на примере площади Пушкина в городе Иваново .....</i>	71
<i>Н.Н. Кудряшов Девизуализация как метод нейтрализации воздействия нового строительства на историческую среду в процессе ее регенерации .....</i>	81



## CONTENTS

<i>P.B. Razgovorov, A.A. Ignatyev, M.A. Abramov, R.S. Nagornov</i> <i>Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media .....</i>	10
<i>T. A. Nizina, V. P. Selyaev, D. R. Nizin, N. S. Kanaeva, D. A. Artamonov</i> <i>Kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymers exposed in a temperate continental climate .....</i>	27
<i>A.L. Balushkin</i> <i>Assessment of the bearing capacity of elements of reinforced concrete floors with regard to adaptation to special effects .....</i>	36
<i>A.A. Ignatyev, V.M. Gotovtsev</i> <i>Transformation of a disturbed sitting drop .....</i>	39
<i>S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, S.A. Loginova</i> <i>Biodegradation of hydrotechnical concrete .....</i>	45
<i>M.Y. Tarshis, L.V. Korolev, S.N. Cherpitsky, A B. Kapranova</i> <i>Quality control system for bulk mix in a continuous drum device .....</i>	56
<i>V.Yu. Verbin, V.M. Dudin</i> <i>Selection of technology for highway road surface overhaul .....</i>	65
<i>A.V. Zakharov, N.A. Isaeva, M.Yu. Pokrovskaya</i> <i>Spatial organization problems (Pushkin Square, Ivanovo) .....</i>	71
<i>N.N. Kudryashov</i> <i>Devisualization as a method of neutralizing the impact of new construction on the historical environment during its regeneration .....</i>	81



УДК 544.723.212:547.426

# *ПЕРЕРАБОТКА АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ И ОТВАЛОВ СТРОИТЕЛЬСТВА МЕТРОПОЛИТЕНА В КОМПОЗИЦИОННЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ И МАСЛОСОДЕРЖАЩИХ СРЕД*

*П.Б. Разговоров<sup>1</sup>, А.А. Игнатъев<sup>1</sup>, М.А. Абрамов<sup>1</sup>, Р.С. Нагорнов<sup>2</sup>*

*Павел Борисович Разговоров<sup>1</sup>  
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru*

*Кафедра технологии строительного производства, Ярославский  
государственный технический университет, ул. Кривога, 40,  
Ярославль, Российская Федерация, 150048*

*Алексей Александрович Игнатъев<sup>1</sup>  
E-mail: ignatyevaa@ystu.ru*

*Кафедра гидротехнического и дорожного строительства,  
Ярославский государственный технический университет, ул.  
Кривога, 40, Ярославль, Российская Федерация, 150048*

*Михаил Андреевич Абрамов<sup>1</sup>  
E-mail: abramovma@ystu.ru*

*Кафедра технологии строительного производства, Ярославский  
государственный технический университет, ул. Кривога, 40,  
Ярославль, Российская Федерация, 150048*

*Роман Сергеевич Нагорнов<sup>2</sup>  
E-mail: postalbox@mail.ru*

*Кафедра организации производства и городского хозяйства,  
Ивановский государственный политехнический университет, пр.  
Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000*



В обзоре на основании анализа литературных работ отечественных и зарубежных ученых и экспериментальных авторских исследований физико-химических свойств природного алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена Москвы установлено, что такие материалы после прокаливания до 350-400 °С и модифицирования могут использоваться в качестве композиционных сорбентов для очистки маслосодержащих сред. Активность материалов определяют размером частиц, пористостью и распределением пор по объему, концентрацией на поверхности дополнительных центров Льюиса и Бренстеда в результате кислотно-щелочной обработки. Такие центры позволяют сорбировать примеси водных и маслосодержащих сред в зависимости от полярности молекул адсорбата. Выявлены перспективные направления отечественных и мировых разработок, связанных с получением композиционных сорбентов путем механохимической обработки алюмосиликатного сырья и строительных глинистых отходов, а также с использованием композитов с включением активированного древесного угля. Отдельно рассматривается вопрос применения экструдированных композитов для упрощения технологического цикла очистки маслосодержащих сред. Показано, что регенерирующая способность получаемых сорбентов во многом определяется присутствующими в них щелочными агентами. Предлагается перечень физико-химических методов комплексного исследования качества очистки сред после осуществления контакта и последующего разделения фаз путем фильтрации.

**Ключевые слова:** природное алюмосиликатное сырье; отвалы строительства метрополитена; модифицирование; композиционные сорбенты; монтмориллонит; каолинит; водные и маслосодержащие среды

**Для цитирования:**

Разговоров П.Б., Игнатъев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С. Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-26 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_10



UDC 544.723.212:547.426

# *PROCESSING OF RAW ALUMINOSILICATES AND SUBWAY CONSTRUCTION DUMPS INTO COMPOSITE SORBENTS FOR PURIFICATION OF WATER AND OIL-CONTAINING MEDIA*

*P.B. Razgovorov<sup>1</sup>, A.A. Ignatyev<sup>1</sup>, M.A. Abramov<sup>1</sup>, R.S. Nagornov<sup>2</sup>*

*Pavel Borisovich Razgovorov<sup>1</sup>  
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru*

*Department of Construction Process Engineering, Yaroslavl State  
Technical University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia*

*Aleksey Aleksandrovich Ignatyev<sup>1</sup>  
E-mail: ignatyevaa@ystu.ru*

*Hydraulic and Road Engineering Department, Yaroslavl State Technical  
University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia*

*Mihail Andreevich Abramov<sup>1</sup>  
E-mail: abramovma@ystu.ru*

*Department of Construction Process Engineering, Yaroslavl State  
Technical University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia*

*Roman Sergeevich Nagornov<sup>2</sup>  
E-mail: postalbox@mail.ru*

*Department of Planning and Municipal Economy, Ivanovo State  
Polytechnic University, 21, Sheremetevsky Prosp., Ivanovo, 153000,  
Russia*



*The study establishes that natural raw aluminosilicate and dumps from Moscow subway construction can be used as composite sorbents for treatment of oil containing media after calcination to 350-400 °C and further modification. To do this, we have analyzed the works of Russian and foreign scientists and authors' experimental studies of physical and chemical properties of these materials. The activity of materials is determined by particle size, porosity, and pore volume distribution, as well as concentration of additional Lewis and Bronsted centers on the surface as a result of acid-alkali treatment. These centers can be used to sorb impurities in aqueous and oily media depending on the polarity of the adsorbate molecules. The study revealed promising directions of research into obtaining composite sorbents by treating raw aluminosilicate raw materials and construction clay waste mechanically and chemically as well as using composites with activated charcoal. The study also elaborates on using extruded composites to simplify technological cycle of purification of oil-containing media. It shows that the regenerating ability of the obtained sorbents is determined in many respects by the alkaline agents present in them. It also includes a list of physical-chemical methods for complex research of media purification quality after contact and subsequent separation of the phases by filtration.*

**Key words:** *natural aluminosilicate raw materials, underground construction dumps, modification, composite sorbents, montmorillonite, kaolinite, water and oil-containing media*

**For citation:**

*Razgovorov P.B., Ignatyev A.A., Abramov M.A., Nagornov R.S. Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 10-26 URL:  
[http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** *10.52957/27821919\_2020\_1\_10*



## ВВЕДЕНИЕ

Природное алюмосиликатное сырье (ПАС) России, применяемое для очистки водных (ВС) и маслосодержащих сред (МС) от примесей – восковых, перекисных соединений и др. [1-3], характеризуется разнородностью физико-химических свойств. Следует также отметить, что подбор ПАС предполагает использование специального оборудования [4] и применение широкого спектра современных методов исследования – ИК и рК спектроскопии, спектрофотометрии, рентгенофазового и дисперсионного анализа, ротационной вискозиметрии [5]. Для решения проблемы часто используют зарубежные аналоги (Topsil, Engelhard и др.), отличающиеся малым разбросом по дисперсности частиц, однако высокой стоимостью (1-2 тыс. дол./т). В этой связи перспективным направлением представляется поиск недефицитного алюмосиликатного сырья с различной глубиной залегания на территории России, которое можно переработать в композиционные сорбенты (КС) с небольшими затратами. По нашим данным [6], хорошие результаты достигаются при использовании с указанной целью отходов строительства метрополитена Москвы – монтмориллонит (ММ)-содержащих (голубой) [6], Fe(III)-содержащих (розовой), Fe(II)-содержащих (зеленой) и гидрослюдистых (черной) порошковых глин, предварительно прокаленных, отмученных и просеянных с выделением частиц размером 5-20 мкм. Отметим, что для повышения сорбционной активности подобного сырья зачастую его необходимо химически модифицировать или активировать [7]; при этом типовой технологический процесс предусматривает использование для модифицирования минеральных кислот, вызывающих разрушение каркаса породообразующих минералов. Таким образом, предлагаемый подход заключается в замене традиционных бентонитов (породообразующий минерал – монтмориллонит, запасы в России – 111 млн. тонн) для очистки указанных сред на более дешевые – отходы строительства метрополитена, подвергнутые вышеуказанной технологической обработке.

В качестве модифицирующей добавки можно использовать растворы органических кислот (щавелевой, янтарной, уксусной), не вызывающие сильного разрушения веществ ПАС. В этом случае для образования на поверхности композиционных сорбентов (КС) дополнительных активных центров целесообразно также подобрать недефицитный щелочной активирующий агент в научно обоснованной концентрации. Это обеспечит решение актуальной задачи получения мезопористых материалов, способных извлекать те или иные примесные ингредиенты из ВС и МС и добиваться необходимой степени очистки. На основе такого сырья можно разрабатывать и эффективные строительные краски для защиты минеральных (бетон, асбоцемент, кирпич) и металлических поверхностей [8]. С целью установления влияния кислотно-щелочной модификации недефицитного алюмосиликатного сырья на эффективность его переработки в КС и защитные строительные композиты, во-первых, важно обратить внимание на химический состав и структуру ПАС, обеспечивающих их потребительские свойства. Во-вторых, целесообразно обосновать последовательность технологических приемов

переработки ПАС. В-третьих, необходимо выявить основные возможности регенерации свойств КС после отработки в технологическом цикле.

Настоящая обзорная работа посвящена изучению и анализу этих вопросов.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА ПРИРОДНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ В КОНТЕКСТЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Уникальную физико-химическую активность ПАС обеспечивают поверхностные гидроксильные (Si-OH, Al-OH, Fe-OH, Mg-OH), мостиковые Si-O(H<sup>+</sup>)-Al и др. группы кислотного или основного характера, поляризованные молекулы воды (центры Бренстеда), координационно-ненасыщенные катионы Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, поверхностные анионы кислорода (центры Льюиса), а также дефекты структуры (ребра, грани, сколы) [9]. Особое внимание в изучении сорбционных свойств ПАС уделяют влиянию pH, температуре и концентрации твердой фазы в обрабатываемых ВС и МС. Известно [10], что земная кора более чем на ¾ состоит из силикатных пород, в меньшей степени – из диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и различных глинистых минералов, отличающихся химическим составом и структурой. Среди глинистых минералов наиболее распространены ММ, каолиниты и гидрослюды (иллиты). Они различаются строением кристаллической решетки, поэтому их сорбционные свойства проявляются по-разному. В зависимости от района расположения и глубины залегания составы ПАС существенно варьируются, вследствие чего для их идентификации необходимо проводить тщательный химический и минералогический анализы.

Сырье, включающее каолинит, имеет континентальное происхождение (глины коры выветривания, озерные, болотные, речные) и образуются, как правило, в кислой среде. Гидрослюдистые материалы могут быть и континентальными, и морскими, формируемыми в кислой, нейтральной и щелочной средах. ММ-сырье имеет морское происхождение и образуется преимущественно в щелочной среде [11]. Основу структуры ПАС во всех случаях составляют тетраэдрические кремнекислородные и октаэдрические алюмокислородно-гидроксильные сетки. Они образуют одноэтажный (одна октаэдрическая сетка), а при соединении друг с другом – двухэтажный (тетраэдрическая и октаэдрическая сетки) и трехэтажный слои (тетраэдрическая и две октаэдрические сетки). У различного ПАС слои имеют неодинаковое строение. Наиболее простые кристаллические решетки характеризуют группу каолинита. Распространенными минералами в этой группе выступают каолинит Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O и галлуазит. Каждый пакет решетки каолинита (рис. 1,а) включает два слоя и состоит из тетраэдрической и октаэдрической сеток, ограниченных двумя параллельными базальными поверхностями [11, 12].

На одной поверхности каолинита располагаются гидроксильные (ОН-) группы, на другой – атомы кислорода, поэтому базальные поверхности пакета каолинита гидроксимически различны. Пакет каолинита обычно нейтрален.



Связь между слоями обусловлена взаимодействием между ОН-группами и атомами кислорода (водородная связь). Такая же водородная связь скрепляет отдельные пакеты между собой; энергия связи составляет 34-42 кДж/моль, а межплоскостное расстояние – 0,71 нм. Из-за жестких связей внутренние базальные поверхности пакетов решетки не могут взаимодействовать с ВС и принимать участие в обменных реакциях.

Внешние базальные поверхности малоактивны, в отличие от краевых участков кристаллов в местах нарушений, сколов и дефектов [11].

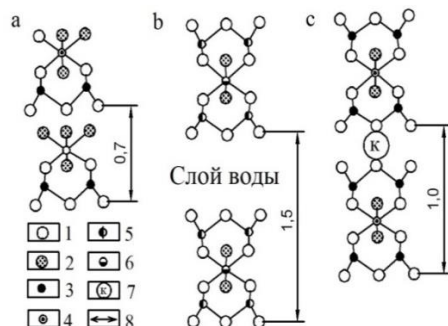


Рис. 1. Сравнение структуры каолинита (а), монтмориллонита (b) и гидрослюда (с):

1 – O; 2 – OH; 3 – Si; 4, 5 – Al; 6 – Al, Mg; 7 – K; 8 – межпакетное расстояние, нм [11]

Fig. 1. Comparison of the structure of kaolinite (a), montmorillonite (b) and hydromica (c):

1 – O; 2 – OH; 3 – Si; 4, 5 – Al; 6 – Al, Mg; 7 – K; 8 – interpacket distance, nm [11]

Высокие показатели адсорбции различных веществ из растворов отличают ПАС на основе ММ (рис. 1, b) [13]. Если сырье содержит по массе не менее 70 % минерала группы ММ, его называют бентонитом. Такие ПАС играют значимую роль в экономическом развитии стран [14, 15]. Кроме очистки ВС и МС, его активно используют в строительной индустрии для гидроизоляции сооружений, при бурении нефтегазовых скважин (буровые растворы), а также в литейном производстве (формовочные смеси), металлургии (связующие для производства рудных окатышей). За последние десятилетия мировое производство бентопродуктов весьма быстрыми темпами развивается в Китае, Польше, Индии и Республике Корея [15]. Однако и Российская Федерация обладает возможностями обеспечить отечественную экономику бентопродуктами требуемого качества – путем выявления новых месторождений и совершенствования технологий переработки как средне-, так и низкосортного сырья. На наш взгляд, одним из источников такого сырья, как уже отмечалось, могут служить недефицитное ПАС – отходы строительства станций метрополитена в крупных городах страны.

Чтобы понять причину ценности бентонита как материала для переработки в КС, рассмотрим структуру его основного минерала – ММ (см. рис. 1, b) более подробно. Как видно из рис. 2, в основе ММ лежит трехслойный пакет (2:1); в нем два слоя кремнекислородных тетраэдров, обращенных вершинами друг к другу, с двух сторон покрывают слой алюмогидроксильных октаэдров [16].

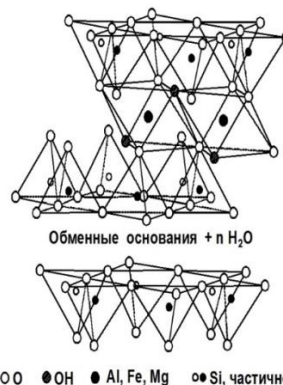


Рис. 2. Кристаллическая структура монтмориллонита [16]

Fig. 2. The crystal structure of montmorillonite [16]

Кислородная базальная поверхность одного пакета взаимодействует с аналогичной поверхностью за счет сил Ван-дер-Ваальса. Энергия связи составляет 8-12 кДж/моль (в 3-4 раза меньше, по сравнению с каолинитом). В этой связи вода и др. полярные жидкости могут проникать между пакетами ММ и раздвигать их, что проявляется в более сильном набухании таких ПАМ, как каолинитовых, вплоть до раскола решетки.

Межплоскостное расстояние для ММ нежесткое и варьируется от 1,0 (сухое состояние) до 14,0 нм (разобщение слоев при сильном водонасыщении). В ММ активны внешние и внутренние поверхности базальных граней, а также краевые участки, как у каолинита. В совокупности активная поверхность ММ-материалов гораздо больше, чем у каолинитовых, а емкость катионного обмена составляет 80-150 ммоль/100 г, тогда как по данным [11], у каолинита она не превышает 3-15 ммоль/100 г. В тетраэдрической сетке кремний замещается алюминием и, возможно, фосфорсодержащими соединениями (сопутствующие вещества вышеуказанных сред). В октаэдрической сетке алюминий замещается магнием, железом, цинком, никелем и др. примесными металлами, которые являются результатом накопления в почве и контакта сырья вышеуказанных сред с металлическим оборудованием. В результате таких изоморфных замещений снижается положительный заряд решетки, уравновешиваемый обменными катионами при адсорбции примесей очищаемых сред между слоями и вокруг их краев. Особенности состава и структуры минералов этой группы отражены на рис. 3.

В группу гидрослюдов с промежуточной площадью активной поверхности (между каолинитовым и ММ-сырьем) входят иллит, глауконит, гидромусковит и др.; при этом пакет кристаллической решетки, казалось бы, является аналогом такового для ММ (рис. 1, c) [11]. Основное отличие заключается в том, что в межпакетном слое присутствуют ионы калия, обеспечивающие этой решетке прочность. У гидрослюдов активны внешние поверхности базальных граней и краевые участки, а внутренние поверхности не активны. При реакции обмена катионы вступают в химическую связь с молекулами твердой фазы, переходя в состав кристаллической решетки.



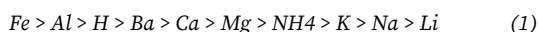


Рис. 3. Особенности состава и структуры минералов группы монтморилюнита [17]

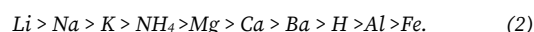
Fig. 3. Features of the composition and structure of minerals of the montmorillonite group [17]

Таким образом, можно полагать, что обменные реакции с участием примесных соединений катионов металлов, содержащихся в ВС и МС, для каолинитового сырья будут протекать по сколам кристаллической решетки, для сырья на основе гидрослюд – по сколам и площади внешних базальных поверхностей, а в ММ-системах – по сколам, внешним базальным и внутренним поверхностям кристаллической решетки.

По энергии поглощения примесные катионы сред располагаются:



а по энергии выхода они составляют ряд [11]:



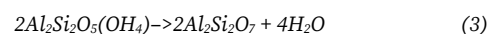
В зависимости от географического местоположения ПАС содержит минералы, отличающиеся цветовыми оттенками и свойствами. Так, например, белая, желтая и красная глины в районе Хартэрмэса Убснурского аймака имеют неодинаковые силикатный и глиноземный модули [18]. Силикатный модуль белой глины равен 6,3, желтой – 2,4, красной – 3,3; глиноземный модуль белой глины составляет 12,8, желтой – 2,4, а красной – 2,9.

Рентгенофазовый анализ образца белой глины показал [18], что она относится к полиминеральной группе, и основными породообразующими минералами в ней выступают каолинит, ММ, альбит и кварц, а примесями – мусковит и кальцит. Состав желтой глины близок к таковому для белой глины, однако, первый дополнительно содержит небольшое количество полевых шпатов и гидрослюд. В свою очередь, красная глина, добываемая при строительных работах, включает ММ, в основном, в виде примеси (как и полевые шпаты), зато в ней присутствуют гематит и гетит, придающие соответствующий цвет.

В работе А.И. Везенцева с соавторами [19] на основании анализа различных дифрактограмм показано, что ММ в составе глинистого сырья в большинстве случаев выступает, как правило, основным породообразующим минералом, причем обогащением удается увеличить его содержание в материале до 75-95 мас. %. Дополнительный эксперимент, проведенный группой М.А. Трезза [20] путем воздействия ИК лучей на образцы ПАС, взятые из различных строительных карьеров, выявил наличие в их составе пирофилита, что объяснялось авторами [20] процессом гидротермального изменения пород. При помощи дифференциально-термического анализа сырья, осуществленного с обжигом при температуре 550-1050 °С, были зафиксированы повышенные значения прочности таких образцов на сжатие.

Применяемые в настоящее время современные физико-химические методы анализа позволяют с высокой достоверностью оценить распределение на поверхности ПАС кислотных и основных центров (бренстедовских, льюисовских) [21, 22], прогнозировать протекание взаимодействий с активными центрами адсорбата [23] и провести собственное его классификацию. Так, например, было выявлено, что образцы Нижнеуельского месторождения относятся к полукислому сырью [24].

Интересным вопросом представляется изучение процесса дегидратации ПАС, а также влияние их химического состава и характеристик кристаллической структуры на эффективность и скорость фазовых переходов между минералами. Например, превращение каолинита в метакаолинит протекает с поглощением тепла (эндотермический процесс) [25]:



При этом исследования образцов Дружковского и Трошковского месторождений выявили высокую скорость дегидратации и образования метакаолинита [25]: выход продукта 90 % достигается буквально за четверть часа. Детальное изучение кинетики таких процессов представили М. Chelly и Е. Srasra [26] на образцах каолинита Табарки и галлуазита Кассерина. Нагревая такие образцы до 100, 300, 500, 700, 1000 и 1200 °С в течение 1 ч, они провели рентгеноструктурный и ИК анализы и определили удельную поверхность, на основании чего, в частности, было выявлено сырье, имеющее склонность к хорошей окристаллизованности (каолинит Табарки) и отличающееся высокой степенью гидратации (галлуазит Кассерина). В [27] О.Н. Каньгина с соавторами показала, что с изменением дисперсности варьируется и фазовый состав порошковых глин. В этом случае качественная интерпретация данных скани-



рующей электронной микроскопии предоставляет исследователям возможность оценить не только размеры частиц, входящих в состав ПАС, но и определить, какие порообразующие вещества преобладают в них, оказывая ключевое влияние на сорбционное извлечение из сред примесных веществ.

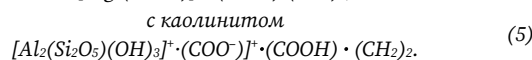
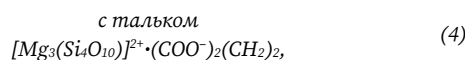
Разработка новых методик анализа исходного сырья для переработки в КС, по мнению Y. Tardy и B. Fritz [28], способна пополнить копилку теоретических основ физико-химической механики ПАС, в частности, за счет новых сведений о величинах свободных энергий Гиббса и оценки степени устойчивости сложных систем «МС – примесные ингредиенты». Однако авторы [28] в то же время указывают, что расчетные экспериментальные растворимости, с учетом полиминерального состава природных материалов, могут быть недостаточно точными при отработке модели смешивания элементов в системе.

### СПОСОБЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ В КОМПОЗИЦИОННЫЕ СОРБЕНТЫ ПУТЕМ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ СВОЙСТВ

Для улучшения и придания ПАС специфических поглотительных свойств осуществляют модифицирование (или активацию) их поверхности [7, 10, 12, 14, 29]. Для алюмосиликатов предпочтительно химическое модифицирование, сущность которого сводится к обработке кислотами и щелочными реагентами. Исследованиями Р. Китаг в группе [30] доказано, что ММ-материалы после модифицирования кислотой могут активно «работать» не только в качестве адсорбентов, но и катализаторов (либо каталитической опоры для протекания различных процессов). В зависимости от концентрации кислоты происходит изменение сорбционной способности ПАС [29, 31]. Прежде всего, необходимо наблюдать за тем, что происходит с поверхностью глин после кислотного модифицирования; большое значение придается уже озвученному методу сканирующей электронной микроскопии и элементному анализу, что подтверждается, в том числе, проведенными нами исследованиями [31]. Выявлено, в частности, что серная кислота способствует разрушению кристаллических форм минералов, из которых состоит ПАС. Это доказательно установлено более десяти лет назад [7] и экспериментально подтверждено исследованиями, проведенными в 2010-х гг. [31]. Чтобы снизить разрушение структуры минералов, для модифицирования целесообразно использовать относительно слабые кислоты [32], прежде всего, органические. Так, при модифицировании каолина 3 %-м раствором уксусной кислоты данные дериватографических исследований и дисперсности, полученные В.Ф. Строгановым и М.О. Амелъченко [32], свидетельствуют, что сырье не претерпело значительного структурного изменения, и такие композиты, вследствие высоких адгезионных свойств, были рекомендованы к применению в строитель-

стве в качестве долгосрочных защитных покрытий. Ранее [29] при оптимизации состава ПАС – модификатор нами также было показано, что растворы уксусной кислоты следует брать в концентрации 3-6 мас. %; в этом случае получаемые композиты предлагалось использовать в качестве эффективного сорбционного материала.

С дополнительным использованием, совместно с микроскопированием, рентгеновского излучения [33] была зафиксирована четкая взаимосвязь изменения состава исходного алюмосиликатного сырья и активности его кислотной обработки. Элементный состав получаемых композитов, по данным [33], представлен Si, Al, K, Fe, Mg; при этом рост концентрации кислоты приводит к увеличению в модифицированном продукте содержания кремния, а для алюминия это содержание снижается. С целью расшифровки свойств получаемых композитов следует также подключать ИК спектроскопию, с помощью которой появление новых химических связей не укроется от опытного исследователя. Так, до кислотной обработки ПАС полосы поглощения при 2805, 3010 и 3100  $\text{см}^{-1}$  Н. Ming и К.М. Spark [34] объяснили растяжением гидроксильных групп, а после воздействия кислоты обнаруженные полосы при 1407  $\text{см}^{-1}$  интерпретировали как результат изгибающих колебаний групп Al-O- или Si-O- и возникновения на этом фоне водородных связей с OH-группами. Л.В. Куртукова с соавторами [35], на основании данных ИК спектроскопических исследований, выразили общее мнение, что составы бентонитовых глин различных месторождений различаются, скорее всего, незначительно, однако интенсивность полос поглощения в зависимости от воздействия на ПАС кислотой, содой или солью может варьироваться весьма существенно. Поэтому целесообразно комбинировать методы исследования, которые, взаимно дополняя друг друга, обеспечат необходимую глубину сделанным выводам. Так, в [30] поверхность и пористость ММ-материала после обработки серной кислотой в различной концентрации оценивались с дополнительным привлечением рентгеновского и ИК анализа. При обработке ПАС раствором соляной кислоты с концентрацией 4-10 % общая пористость глин, по А.А. Мельдешову [36], составляла 50-54 %, а суммарный объем пор – 0,36-0,40  $\text{см}^3/\text{г}$ . Последующее повышение концентрации HCl приводило к слабому снижению сорбционных характеристик материала. Вероятно, это является следствием разрушения связей Si-O-Al, что согласуется с данными, приведенными в [32]. При обработке нами голубой ММ-глины, исследуемой в [6] сильными кислотами (0,5-2,0 М) выявлено, что катионы кальция и натрия вымываются из нее на 67-70 %. И.А. Ворсина с соавторами [37] использовали для обработки ПАС янтарную кислоту; при этом протекает механохимическая реакция нейтрализации основных центров протонами кислоты с образованием механокомпозитов:

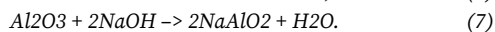
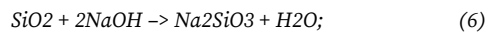


Янтарная кислота, как выяснилось [37], влияет на структуру КС: в инфракрасном спектре силикатов наблюдается смена четких максимумов уширением полосы ( $\delta$



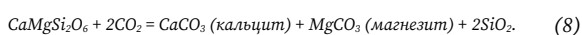
$\text{SiO}_4^-$ ) в тетраэдрической решетке; разрушение подтверждается данными рентгенофазового анализа. Комплексное изучение влияния кислотной активации ПАС, проведенное в последнее десятилетие различными группами ученых [31, 33], показывает, что в составе алюмосиликата при этом повышается содержание диоксида кремния.

Помимо кислотной обработки, до сих пор ведутся исследования влияния щелочного модифицирования ПАС на способность к извлечению отдельных нежелательных примесей из МС, например, соединений Cs [38]. А.И. Тучкова с соавторами [38] установили факт как увеличения, так и уменьшения размеров частиц твердой фазы после воздействия на них щелочи, что может негативно повлиять на поглощательную способность модифицированных продуктов. В ходе нейтрализации последних серной кислотой значительные изменения размеров части не были выявлены, что указывает на положительное влияние снижения щелочности среды при адсорбции примесей МС. При переработке алюмосиликатов с воздействием щелочи обнаружено образование силиката и алюмината натрия по схемам [39]:



Около полувека назад в ходе изучения химических свойств цеолитов было показано [40], что связь Si-O-Si в щелочной среде менее устойчива по сравнению со связью Si-O-Al, поэтому выход иона кремния из ПАС в раствор ожидается легче, чем выход иона алюминия. Современные данные рентгенофазового анализа, осуществленные группой Л.И. Бельчинской [39], выявили общее снижение содержания ММ в модифицированном продукте при одновременном увеличении (в 2,2 раза) суммарного объема пор и удельной поверхности (в 1,5 раз) за счет частичного подрастворения  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

К модифицированию физико-химических свойств ПАС приводит также термообработка, не требующая использования дополнительных реагентов и сложного аппаратного оформления. Данные рентгенографии и ИК спектроскопии образцов, подвергнутых прокаливанию при температуре 500 °С [41], указывают на изменение формы частиц: минералы, структурно отнесенные к слоистым алюмосиликатам, дают образования, встречающиеся в минералах цеолитовой группы. В свою очередь, эффект механохимического модифицирования ПАС связывается с диспергированием частиц. Так, Ф.А. Трофимова и др. [42] при стандартной методике механоактивации измельчали исходный ММ (средний размер частиц 5,3 мкм) до 2,5 мкм, а в итоге многократного пластического воздействия на образце наблюдали, как из среднелдисперсного состояния он переходил в высокодисперсное (1,8 мкм) с развитой базальной поверхностью. Не исключается и поглощение углекислого газа кальций- и магнийсодержащими силикатами под влиянием механических воздействий, проявляющееся по мере роста содержания кальция в минерале:



В [43] высказана гипотеза о проникновении молекул углекислого газа в объем частиц ПАС и их «растворении» в структурно разупорядоченной силикатной матрице в виде

искаженных  $\text{CO}_3^{2-}$ -ионов. Аналогичная картина характеризует поведение  $\text{CO}_2$  в силикатных расплавах. Н.О. Зулумян с соавторами [44] при получении механоактивированного каолинита ( $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ ) наблюдали отрыв OH-групп и образование «гидроксильной воды»; в то же время энергии для разрыва силоксановых мостиков в гексагональных кольцах каолинита недостаточно (связи Si-O, сформированные в магме при высоких давлениях и температурах, достаточно прочны).

В настоящее время активно разрабатываются новые методики создания интеркалированных и расслоенных «умных» композитов на основе ПАС. Так, под руководством М.Ф. Бутмана и А.В. Агафонова [45] получены образцы пилларированного ММ с высокой удельной поверхностью и значительным суммарным объемом пор. Основной задачей исследования наносистем типа «слоистый силикат – полимер» является улучшение совместимости в них сочетаемых компонентов, что подтвердили результаты Р. Akkari и E. Spasra [46], которые получали полибензидинглины путем интеркаляции бензидина между слоями минералов ПАС. При этом воду удаляли механохимически, а полимеризацию осуществляли в межслоевом пространстве. Таким образом, авторы [46] доказали, что ПАС является источником для получения нового композита, который в безглиновом образце не существует; перспективным оказался и механохимический синтез системы «ММ – полибензидин».

Интересными представляются модифицированные смектиты группы S. Arfaoui [47]. Анализ дифрактограмм показал, что межплоскостное расстояние 21,13 Å отвечает интеркаляции Cr(III) в решетку смектита, а по термограммам выявлено, что структура обеспечивает стабильность материала в поле высоких температур; с помощью сканирующей электронной микроскопии установлено, что вкрапления Cr(III) обеспечивают материалу губчатую текстуру.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ

ПАС, добываемое при строительных работах и зачастую направляемое в отвалы на полигоны РФ, находит применение во многих отраслях производственной сферы, одной из которых является сорбционная очистка промышленных сточных вод [16, 17]. Контроль степени загрязнения ВС осуществляют путем анализа сорбции катионов металлов из растворов. В XXI столетии значительно вырос интерес к использованию недорогих сорбентов; с этой ролью хорошо справляются смеси ПАС и сельскохозяйственных отходов [48]. При этом такие КС обеспечивают показатель очистки промышленных сточных вод от соединений тяжелых металлов на 90-97 %.

Непосредственно ПАС применяют для очистки ВС от металлорганических и коллоидных соединений, нефтепродуктов, а также ликвидации ситуаций, связанных с загрязнением природных сред радионуклидами, как это показано на примере Cs [38]. В этой связи В.В. Милютиным с

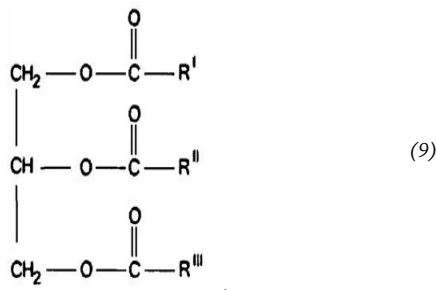


группой исследователей [49] выявлено, что использование ПАС при цементировании жидких радиоактивных сред (кубовых остатков атомных электростанций) позволяет снизить скорость выщелачивания цезия из отвержденных компаундов в 5-16 раз; наиболее подходящим сырьем является ММ-глина. Физико-химические свойства смектитовой глины Северного Туниса, насыщенной одно-, двух- и трехвалентными катионами [50], определяются влиянием противоионов, а также зависят от воздействия температуры (от 25 до 400 °С). Термообработка снижает обменную способность и влияет на гидрофобизацию с участием  $Li^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $Al^{3+}$ . Обширные исследования с использованием кислотного активированного каолина в качестве КС, а также ММ представлены в [32, 51]. К.Л. Тимофеев с соавторами [52] доказали целесообразность использования активированного ММ для извлечения соединений индия из сложных растворов цинкового производства. Исследованиями группой М.А. Patel [53] сорбции  $Eu(III)$  на ММ из сред с различными рН показано, что процесс активизируется в присутствии фосфатов и при концентрации сорбента 0,5 г/л, а при более высокой загрузке ММ-сырье не оказывает влияния на эффективность извлечения. ММ и устойчивые соединения между амидо- и сульфогидрильными группами, по Q. Zhou, G. Pan, W. Shen [54], могут применяться для выделения хрома (VI) из ВС.

Ведутся разработки комплексного подхода к «паспортизации» ПАС, особенно актуальные в контексте того факта, что получаемые в результате кислотно-щелочной модификации композиты улучшают механические и термические свойства полимеров в упаковке пищевых продуктов [55]. В целом, сфера применения природного и модифицированного алюмосиликатного сырья разнообразна, и особое место в этом ряду занимают МС.

#### УПРАВЛЕНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ МАСЛОСОДЕРЖАЩИХ СРЕД ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В НИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОРБЕНТОВ

Основу МС составляют триглицериды жирных кислот (ТГЖК), которые имеют общую формулу:



где  $R^I$ ,  $R^{II}$  и  $R^{III}$  – остатки высокомолекулярных жирных кислот (пальмитиновой, стеариновой, олеиновой, линолевой и др.). Такие среды содержат ряд нежелательных примесных ингредиентов (катионы металлов, перекисные и фосфорсодержащие соединения, компоненты пигментного комплекса – каротиноиды и хорофиллы, воски и др.), кото-

рые, с учетом полученных нами данных [1, 6, 22, 23, 31], могут вступать в контакт с молекулами ПАС и продуктов его переработки в КС.

Физико-химические свойства и устойчивость МС к хранению в присутствии примесей различного характера целесообразно изучать при совместном действии на них ПАС, КС, а также стабилизирующих органических добавок [56] –  $\beta$ -лактоглобулина, тирозола, мальтодекстринов, взятых в различных концентрациях. При этом с введением КС и органических веществ в масла возрастает вязкость эмульсии и обеспечивается высокая защита от окисления.

Поскольку МС из-под пресса, как уже отмечалось, содержат значительное количество сопутствующих ингредиентов, существенно влияющих на физико-химические характеристики, для повышения срока их хранения осуществляют дополнительные стадии очистки, представленные на рис. 4.

Для очистки масел (ТГЖК) от минорных компонентов [57], в особенности, спектра компонентов пигментного комплекса, в промышленности применяют отбелительные глины – материалы на базе ММ или каолина [1, 23, 24] и добавки-инициаторы кристаллизации восковых соединений, имеющие также алюмосиликатную основу [58, 59].

В России известны отдельные патентные разработки в сфере очистки МС от примесных восков и загрязняющих веществ [60], однако экономическая сторона вопроса в них не всегда является целесообразной. Основные направления исследований связаны с детальным изучением [61] и изменением сорбционной активности недавно открытых мировых месторождений сорбционных материалов. Так, группой А.А. Сабитова изучены сепиолитовые глины Меттегерского проявления (Республика Саха, Якутия) [62], которые могут применяться для очистки масел. А. Singeri и E. Galan, в свою очередь, заявили, что магнетитовый глинистый минерал  $Mg_6Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH)_4 \cdot 8H_2O$ , имеющий слоистую цепочкообразную структуру [63], также пригоден для очистки МС. С.Ш. Исмаиловыми и Д.У. Худоевым [64] проведено сравнение сорбционной активности асканита (Грузия), бентонита Навбахорского месторождения, турсохского палыгорскита и опоквидной глины Кермине в отношении эффективности очистки масел, выделенных из хлопка. Полученные результаты [64] дополнительно подтвердили, что различные минералы проявляют неодинаковую избирательность при сорбции примесей МС: бентониты хорошо сорбируют кислые ингредиенты, а опоки лучше извлекают соединения металлов.

Как уже отмечалось ранее, для улучшения сорбционных свойств ПАС прибегают к их модифицированию. Наиболее распространена кислотная обработка, при которой изменяются структура, пористость и свойства поверхности материалов. Так, анализ физико-химических характеристик Тунисских глин [65], отнесенных к смектитовым, показал, что модифицирование их соляной кислотой приводит к увеличению удельной поверхности и повышению степени осветления МС. В свою очередь, изучение изотермы адсорбции на КС – кислотного активированного сепиолита общих фосфолипидов из сред на основе рыжикового и рапсового масел, в условиях дополнительного введения добавки лимонной кислоты [66], позволило выявить относительно слабый контакт фосфорнокислых фрагмен-



тов с частицами твердой фазы. При этом соли натрия снижают емкость насыщения КС, а соли кальция и магния не способны сформировать устойчивую структуру на поверхности получаемого при активации материала.

Разработки новых технологий связаны с вопросами снижения концентрации активирующих кислот и продолжительности модифицирования ПАС. Этот вопрос, в частности, изучался при ультразвуковой обработке сред [67]. В итоге удаление примесных соединений из них осуществляется с наименьшими потерями желательных фракций. При этом не следует отрицать влияния технологических особенностей, связанных с изменением кислотности материалов. С помощью ПАС и его модифицированных форм удастся, например, как отмечалось выше, извлекать большую часть катионов примесных металлов, присутствующих в МС, упростить многостадийную их очистку, а также исключить обработку дополнительными реагентами. Кисотно-активированное глинистое сырье, добываемое из строительных карьеров, может также применяться для удаления пигментирующих веществ и свободных жирных кислот путем осаждения и экстракции гексаном [68]. Корейским ученым [68] при добавлении 3,5 г глины к 10 мл неочищенного масляного раствора удавалось добиться степени очистки среды от избыточных кислых ингредиентов, достигающей 37 %. Установлено [69], что подходящая продолжительность осветления системы «масло – примеси» обеспечивается уже через 2 ч обработки ПАСЗМ соляной кислотой; при этом возрастает удельная поверхность получаемых КС. Активация поверхности тунисских глин соляной кислотой с целью улучшения физико-химических и сорбционных свойств [70] при варьировании продолжительности (2, 4 и 6 ч) и температуры (20, 50, 75 и 90 °С) их контакта с МС выявила оптимальные параметры: 2-6 ч воздействия при 75 °С; количество сорбента 0,75 мас. %; степень осветления среды составила 55 %. Отбеливание же МС с редким набором ТГЖК (пример – масло Чуфа) [71] рекомендуется проводить с использованием модифицированных глинистых материалов в количестве, достигающем уже 2,0 мас. %. Отработанные КС удаляют с помощью центрифуг, а жидкую фазу фильтруют.

В настоящее время перед промышленностью остро стоят вопросы, связанные с разработкой технологий безотходного производства очистки МС от примесей, а также с получением новых сорбентов с высоким ресурсом работы и малыми затратами времени на их регенерацию [72]. Это должно привести к тому, что применяемое ПАС и КС будет выгодно использовать как с экологической, так и экономической точки зрения. В частности, представляют интерес исследования В.У. Сувановой [73], предлагающей проводить модифицирование поверхности и сушку ПАС при температуре 350–400 °С, что позволит полностью восстановить их сорбционные свойства после отработки в контакте с компонентами пигментного комплекса МС; при этом термическое воздействие не влияет на минеральную структуру сорбента. В принципе, ПАС можно неоднократно вводить в масла без потери адсорбционной способности, если прокалывать их при температуре 600 °С. Также следует знать, что щелочно-кислотное модифицирование ПАС, хотя и повышает регенерирующую способность, однако она все же ниже, чем у материалов после кислотной или

кислотно-щелочной обработки. На основании этого можно сделать логический вывод, что регенерирующая способность алюмосиликатных сорбентов во многом определяется присутствующими в них щелочными агентами.

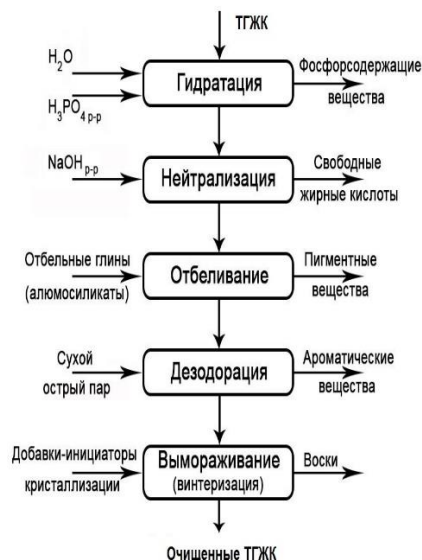


Рис. 4. Полная схема очистки масел (ТГЖК) с использованием ПАС

Fig. 4. Complete purification scheme for cleaning of oils (fatty acids triglycerides) using natural aluminosilicate materials

Отдельные перспективные направления связаны с разработкой КС, включающих добавку активированного древесного угля и отличающихся высоким показателем отбеливания и умеренной маслосемкостью [74], а также получением экструдированных алюмосиликатных композитов с комплексом новых свойств. Понятно, что введение в жидкую фазу любого порошкового сорбента для извлечения примесей МС по окончании обработки требует обязательной фильтрации. В случае использования гранулированного или блочного сорбента процесс, как нами установлено [75], можно осуществлять в непрерывном режиме, исключая стадию разделения твердой и жидкой фаз и упрощая технологический цикл. Характерно, что сформированные блоки имеют низкое гидравлическое сопротивление слоя и, напротив, значительную степень использования внутренней поверхности. Путем модифицирования ПАС, в том числе материалов из отходов строительства метрополитена, подвергнутых отмучиванию и выделению фракции частиц размером 5-20 мкм, действительно, можно эффективно варьировать физико-химические свойства сорбента, в частности, его пористость (модификатор – уксусная кислота) [75]. Однако при этом попутно возрастает и хрупкость блока, что затрудняет экструзию. Проблема решается дополнительным введением в состав сорбента натриевого жидкого стекла. Так, О.Н. Захаров с соавторами [76] использовали в качестве ПАС карьерную глину Малоступкинского месторождения, подвергнутую модифицированию уксусной кислотой и натриевым жидким стеклом (5-10 мас. %), с высокой способностью формочной массы к экструзии и созданию блоков сотовой структуры. Очистку МС от примесей можно также осу-



щественность с применением простых форм экструдированного сорбента (например, сферических или гранул).

Для оценки качества очистки МС от примесей различной природы и химического строения, кроме традиционных методов фиксации изменения показателей кислотного, перекисного и цветного числа среды, целесообразно дополнительно привлекать методы электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии [77], хромато-масс-спектрометрической идентификации, исследования ядерно-магнитных релаксационных характеристик жидкой фазы, рефрактометрии, спектрофотометрии и ИК спектроскопии, а также дифференциальной сканирующей калориметрии.

## ВЫВОДЫ

Для эффективной очистки водных и маслосодержащих сред экономически и экологически целесообразно создание композиционных сорбентов на базе отходов строительства метрополитена, а также включение в состав ПАС сельскохозяйственных отходов или активированного угля. При этом использование блочных сорбентов способствует снижению трудозатрат в ходе осуществления очистки сред в непрерывном режиме и исключения операции фильтрации жидкой фазы.

Природное алюмосиликатное сырье из строительных карьеров можно перерабатывать в композиционные сорбенты, активность которых регулируется варьированием концентрации дополнительных центров Льюиса и Бренстеда, образующихся при обработке частиц твердой фазы (монтмориллонита, каолинита) органическими кислотами (уксусной, щавелевой, лимонной и др.) в количестве до 6 мас. % и щелочью. Это позволяет извлекать примеси водных и маслосодержащих сред в зависимости от поставленной технологической задачи.

Перспективное направление отечественных и мировых разработок связано с получением композиционных сорбентов на базе строительного сырья с включением монтмориллонита, подвергнутого механохимическому воздействию с последующим протеканием полимеризации между его слоями.

Наличие активных центров щелочного характера на поверхности алюмосиликатного сырья, добываемого в ходе строительных работ, и его модифицированных форм в концентрации, индивидуальной для каждого вида сорбента, во многом определяет способность к последующему восстановлению поглотительных свойств получаемых композиционных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Prokof'ev V.Yu., Razgovorov P.B., Gordina N.E. The adsorption of undesirable impurities from sunflower oil the granulated sorbents based on caolin clay. *Int. J. Food Eng.* 2014. V. 10. N 4. P. 713-720.
2. Разговоров П.Б., Ситанов С.В., Козлов В.А. Изучение взаимодействия некоторых затравочных материалов и сложноэфирной составляющей воскоподобных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2002. Т. 45. Вып. 1. С. 34-37.
3. Разговоров П.Б., Ситанов С.В. Экспресс-анализ восков в растительных маслах. *Масложир. пром-сть.* 2009. № 3. С. 21-23.
4. Разговоров П.Б., Горшков В.К. Технологическое оборудование отрасли: расчеты в масложировых производствах: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2009. 48 с.
5. Лыгина Т.З., Михайлова О.А. Физико-химические и адсорбционные методы исследования неорганических природных минеральных сорбентов: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. технол. ун-т. 2009. 80 с.
6. Разговоров П.Б., Назорнов Р.С., Разговорова М.П. Использование голубой глины для выделения примесных веществ из льняного масла. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 12. С. 72-75.
7. Лыгина Т.З., Михайлова О.А., Хацринов А.И., Конюхова Т.П. Технологии химической активации неорганических природных минеральных сорбентов. Казань: Казан. гос. технол. ун-т. 2009. 120 с.
8. Лукомский Ю.Я., Горшков В.К., Разговоров П.Б. Гальванические и лакокрасочные покрытия на алюминии и его сплавах. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2010. 239 с.
9. Bel'chinskaya L.I., Khodosova N.A., Novikova L.A., Strel'nikova O.Yu., Roessner F., Petukhova G.A., Zhabin A.V. Regulation of sorption processes in natural nanoporous aluminosilicates. 2. Determination of the ratio between active sites. *Protect. Met. Phys. Chem. Surf.* 2016. V. 52. N 4. P. 599-606.
10. Гревцев В.А., Лыгина Т.З. Морфологические и структурные особенности природных, активированных и синтезированных веществ. *Вестн. Казан. технол. ун-та.* 2010. № 8. С. 236-249.
11. Гольдберг В. М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра. 1986. 160 с.
12. Shar'kin N.P., Razov V.I., Khal'chenko I.G., Shkuratov A.L., Korochentsev V.V., Mayorov V.I. Studies of natural kaolinite and its modified forms. *J. Inorg. Chem.* 2016. V. 61. N 11. P. 1463-1471.
13. Михайлов Г.Г., Лонзингер Т.М., Морозова А.Г., Скотников В.А., Лонзингер А.В., Кутуев А.А. Влияние состава и структуры природных алюмосиликатных материалов Челябинской области на сорбционные свойства. *Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Металлургия.* 2015. Т. 15. № 4. С. 42-50.
14. Шарафиев Д.Р., Хацринов А.И., Усманов Н.В., Касымова Г.И. Модифицированные природные адсорбенты для рафинации растительных масел. *Вестн. Технол. ун-та.* 2017. Т. 20. № 18. С. 88-92.
15. Сабитов А.А., Руселик Е.С., Трофимова Ф.А., Тетерин А.Н. Бентониты России: состояние освоения и перспективы развития сырьевой базы. *Минерал. ресурсы России. Экономика и управление.* 2010. № 5. С. 8-17.
16. Ходосова Н.А., Пряженцева К.А., Зотова С.А. Оценка сорбционной способности природных и кислотно-активированных алюмосиликатов различной структуры. *Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. Высокие технологии. Экология.* 2016. № 1. С. 130-136.
17. Сапронова Ж.А., Гомес М.Ж., Свергузова С.В. Ультрафиолетовая активация природных глин ангольских



- месторождений для повышения их сорбционной активности в процессах водоочистки. Белгород: Белгород. гос. технол. ун-т. 2015. 157 с.
18. **Цэрэнханд Б., Баяраа Б., Долмаа Г.** Химический и минералогический состав некоторых глин Убснурского аймака (Монголия). Вестн. Бурят. гос. ун-та. 2014. Т. 3. С. 17-20.
  19. **Везенцев А.И., Кормош Е.В., Здоренко Н.М., Голдовская-Перистая Л.Ф.** Адсорбционные свойства продуктов обогащения природных монтмориллонитсодержащих глин. Науч. ведомости. Сер. Естеств. науки. 2011. № 9. Вып. 15. С. 103-109.
  20. **Trezza M.A., Tironi A., Grassar E.F.** Thermal Activation of Two Complex Clays (Kaolinite-Pyrophyllite-Illite) from Tandilia System, Buenos Aires, Argentina. In book: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. 2018. P. 469-474.
  21. **Ryazanov M.A., Dudkin B.N.** Acid-Base Properties of  $\gamma$ - $Al_2O_3$  Suspension Studied by pK Spectroscopy. *Colloid J.* 2003. V. 65. No 6. P. 761-766.
  22. **Разговоров П.Б., Нагорнов Р.С., Разговорова М.П., Гречин О.В.** Регулирование кислотно-основных свойств алюмосиликатных материалов с целью влияния на степень очистки оливкового масла. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2015. Т. 58. Вып. 10. С. 58-63.
  23. **Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б.** Физико-химические процессы, протекающие при введении каолиновых глин в растительные масла. Химия растительного сырья. 2010. № 2. С. 159-164.
  24. **Щербаков А.А., Клепов М.С., Солодкий Н.Ф., Сериков А.С., Рукавишников В.В., Жестков В.М., Белевтин В.А.** Физико-химические исследования кондиционных и некондиционных глин Нижнеуельского месторождения Челябинской области. Башкир. хим. журн. 2011. Т. 18. № 4. С. 236-239.
  25. **Ламберов А.А., Ситникова Е.Ю., Абдулганеева А.Ш.** Влияние состава и структуры каолиновых глин на условия перехода каолинита в метакаолинит. Вестн. Казан. технол. ун-та. 2011. № 7. С. 17-23.
  26. **Shelly M., Srasra E.** Physicochemical characterization and thermal behavior of two Tunisians kaolins. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 1. P. 47-55.
  27. **Каныгина О.Н., Кравцова О.С., Четверикова А.Г., Кулеева А.Х., Сальникова Е.В., Волков Е.В., Шамбулатова А.Т.** Фракционные составы кирпичных глин Оренбуржья. Вестн. ОГУ. 2011. Т. 131. № 12. С. 396-398.
  28. **Tardy Y., Fritz B.** An ideal solid solution model for calculating solubility of clay minerals. *Clay Minerals.* 1981. V. 16. N 4. P. 361-373.
  29. **Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Смирнов К.В., Ильина А.П., Шушкина Е.А.** Очистка льняного масла на модифицированной белой глине. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2007. Т. 50. Вып. 6. С. 56-59.
  30. **Kumar P., Jasra R.V., Bhat T.S.G.** Evolution of Porosity and Surface Acidity in Montmorillonite Clay on Acid. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1995. N 34. P. 1440-1448.
  31. **Нагорнов Р.С., Разговоров П.Б., Лепилова А.М., Строганова Ю.И., Смирнов П.Р., Кочетков С.П.** Щадящая активация полиминерального сорбента и ее влияние на процесс очистки маслосодержащих сред от примесных ингредиентов. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. Вып. 8. С. 53-59.
  32. **Строганов В. Ф., Амельченко М.О.** Исследование влияние кислотной активации каолина на свойства водно-дисперсионных защитных покрытий. Изв. Казан. гос. архит.-строит. ун-та. 2014. Т. 30. № 4. С. 284-290.
  33. **Yahaya S., Jikan S.S., Badarulzaman N.A., Adami A.D.** Effects of Acid Treatment on the SEM-EDX Characteristics of Kaolin Clay. *Path Sci.* 2017. V. 9. N3. P. 4001-4002.
  34. **Ming H., Spark K.M.** Radio Frequency Plasma-Induced Hydrogen Bonding on Kaolinite. *J. Phys. Chem.* 2003. V. 107. N 3. P. 694-702.
  35. **Куртукова Л.В., Сомин В.А., Комарова Л.Ф.** Изменение свойств бентонитовых глин под действием различных активаторов. Ползуновский вестн. 2013. №1. С. 287-289.
  36. **Мельдешов А.А.** Адсорбционные характеристики активированной Келесской глины. Вестн. Казах. Акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2017. Т. 101. № 2. С. 48-52.
  37. **Vorsina L.A., Grigor'eva T.F., Devyatkina E.T., Vosmerikov S.V., Udalova T.A., Lyakhov N.Z.** Interaction of organic acids with silicates in the course of joint mechanical activation. *J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 3. P. 334-341.
  38. **Тучкова А.И., Тюпина Е.А., Рахимов М.Г.** Влияние щелочной активации глинистых минералов на их сорбционную способность к извлечению Cs-137 из отработанного масла. Усп. в химии и хим. технологии. 2012. Т. XXVI. № 6. С. 92-95.
  39. **Bel'chinskaya L.I., Voishcheva O.V., Khokhlov V.Y., Lu T.Y., Zhabin A.V., Petukhova G.A.** The influence of alkaline treatment on the chemical composition and adsorption-structural characteristics of mineral nanoporous sorbent  $M_{45}K_{20}$ . *Protect. Met. Phys. Chem. Surf.* 2012. V. 48. No 3. P. 322-327.
  40. **Жданов С.П., Егорова Е.Н.** Химия цеолитов. Л.: Наука. 1968. 158 с.
  41. **Lebedev M., Zhernovsky I., Stroková V.** Effect of Heat Treatment on Phase Compositions of Clay Aluminosilicates. *Nanotechnology in Construction.* 2015. P.123-129.
  42. **Трофимова Ф.А., Губайдуллина А.М., Демидова М.И.** Степень дисперсности, как один из критериев качества природных алюмосиликатов. Вестн. Казан. технол. ун-та. 2010. № 6. С. 218-224.
  43. **Kalinkin A.M., Kalinkina E.V., Zalkind O.A.** Mechano-sorption of carbon dioxide by Ca- and Mg-containing silicates and aluminosilicates. Sorption of  $CO_2$  and structure-related chemical changes. *Colloid J.* 2009. V. 71. No 2. P. 185-192.
  44. **Zulumyan N.H., Papakhchyan L.R., Isahakyan A.R., Beglaryan H.A., Aloyan S.G.** Effect of mechanical treatment on the silicate lattice of kaolinite. *J. Phys. Chem.* 2012. V. 86. No 12. P. 1887-1891.
  45. **Бутман М.Ф., Овчинников Н.Л., Арбузников В.В., Агафонов А.В.** Синтез и свойства Al-пилларированного монтмориллонита природного происхождения. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. № 8. С. 73-77.
  46. **Akkari R., Srasra E.** Polybenzidine-montmorillonite nanocomposites: synthesis via a mechanochemical intercalation method. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2010. V. 46. N 4. P. 361-366.
  47. **Arfaoui S., Frini-Srasra N., Srasra E.** Synthesis and characterization of hydroxy-chromium pillared bentonite. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 3. P. 239-245.



48. **Hlihor R.M., Gavrilesu M.** Removal of some environmentally relevant heavy metals using low-cost natural sorbents. *Environ. Eng. Manag. J.* 2009. V. 2. N 8. P. 353-372.
49. **Mulyutin V.V., Gelis V.M., Nekrasova N.A., Kononenko O.A., Vezentsev A.I., Volovicheva N.A., Korol'kova S.V.** Sorption of Cs, Sr, U, and Pu radionuclides on natural and modified clays. *Radiochem.* 2012. V. 54. N 1. P. 75-78.
50. **Ayari F., Srasra E., Trabelsi-Ayad M.** Effect of exchangeable cations on the physicochemical properties of smectite. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2007. V. 43. N 5. P. 369-378.
51. **Teng M.-Y., Lin S.-H.** Removal of basic dye from water onto pristine and HCl-activated montmorillonite in fixed beds. *Desalination.* 2006. V. 194. N 1-3. P. 156-165.
52. **Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Свиридов А.В.** Извлечение индия из растворов высокодисперсными модифицированными алюмосиликатами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 7. С. 35-41.
53. **Patel M.A., Kar A.S., Kumar S., Tomar B.S.** Effect of phosphate on sorption of Eu (III) by montmorillonite. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2017. V. 313. N 3. P. 537-545.
54. **Zhou Q., Pan G., Shen W.** Enhanced sorption of perfluorooctane sulfonate and Cr(VI) on organomontmorillonite: Influence of solution pH and uptake mechanism. *Adsorption.* 2013. V. 19. N 2-4. P. 709-715.
55. **Goyal S., Goyal G.K.** Nanotechnology in food packaging – a critical review. *Rus. J. Agricult. and Soc.-Econ. Sci.* 2012. V. 10. N 10. P. 10-24.
56. **Mattia C.D., Paradiso V.M., Andrich L., Giarnetti M., Caponio F., Pittia P.** Effect of Olive Oil Phenolic Compounds and Maltodextrins on the Physical Properties and Oxidative Stability of Olive Oil O/W Emulsions. *Food Biophys.* 2014. V. 9. N 4. P. 396-405.
57. **Aladedunye F.A., Przybylski R.** Frying Performance of Canola Oil Triacylglycerides as Affected by Vegetable Oils Minor Components. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 2012. V. 89. N 1. P. 41-53.
58. **Разговоров П.Б.** Выделение восков из маслосодержащих систем в присутствии добавок сорбентов и эмульгаторов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2006. Т. 49. Вып. 5. С. 3-10.
59. **Разговоров П.Б., Прокофьев В.Ю., Разговорова М.П.** Изучение процесса кристаллообразования восков в растительных маслах при введении затравочных минеральных добавок. *Химия растительного сырья.* 2013. Вып. 2. С. 207-212.
60. **Герасименко Е.О.** Патент РФ № 2174993. 2001.
61. **Nasedkin V.V., Boeva N.M., Garbuzova I.A., Koval'chuk M.V., Vasil'iev A.L.** The crystal structure and chemistry of several palygorskite samples with different geneses. *Crystallogr. Reports.* 2009. V. 54. N 5. P. 884-900.
62. **Сабитов А.А., Галиахметов Р.Г., Трофимова Ф.А., Руселик Е.С., Николаева Л.М.** Сепиолитовые глины Метегерского проявления (Республика Саха (Якутия)) – новый вид нерудного сырья в России. *Разведка и охрана недр.* 2015. № 4. С. 29-34.
63. **Singer A., Galan E.** Developments in Palygorskite-Sepiolite Research. *A New Outlook of these Nanomaterials.* Elsevier: Oxford-Amsterdam. 2011. 520 p.
64. **Исмаилов С.Ш., Худоев Д.У.** Эффекты местных адсорбентов для очистки хлопкового масла и продуктов его переработки. *Вопр. науки и образования.* 2017. № 1. С. 45-46.
65. **Hechi E., Amor O.B., Srasra E., Zargouni F.** Physico-chemical characterization of acid-activated clay: its industrial application in the clarification of vegetable oils. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 2. P. 140-144.
66. **Laatikainen M., Srithammavut W., Toukoniitty B., Turunen I., Sainio T.** Phospholipid adsorption from vegetable oils on acid-activated sepiolite. *Adsorption.* 2015. V. 21. N 5. P. 409-417.
67. **Essid K., Jahwach-Rabai W., Trabelsi M., Frikha M.H.** Sterolic Composition of Neutralized Oils Bleached with Clays Activated with Ultrasound. *Iran. J. Sci. Technol. Transact. A: Sci.* 2016. V. 40. N 3. P. 183-189.
68. **Su H., Wang X., Kim Y.G., Kim S.B., Seo Y.-G., Kim J.S., Kim C.-J.** Optimization of decoloring conditions of crude fatty acids recovered from crude glycerol by acid-activated clay using response surface method. *Korean J. Chem. Eng.* 2014. V. 31. N 11. P. 2070-2076.
69. **Hechi A.E., Srasra E., Zargouni F.** Physico-chemical characterization of acid-activated clay: its industrial application in the clarification of vegetable oils. *Mater. Sci. Ind. J.* 2007. V. 3. N 3. P. 146-149.
70. **Chakroun S., Herchi M., Mechti W., Gaied M.E.** Acid activation of upper Eocene Ca-bentonite for soybean oil clarification. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2017. V. 24. N 28. P. 22557-22569.
71. **Yoon S.H.** Optimization of the refining process and oxidative stability of chufa (*Cyperus esculentus* L.) oil for edible purposes. *Food Sci. Biotechnol.* 2016. V. 25. N 1. P. 85-90.
72. **Паранук А.А., Хрисониди В.А., Пономарева Г.В., Гучетль З.Ч., Лысенко Ю.А.** Разработка установки осушки масла на цеолитах. *Усп. соврем. науки.* 2017. Т. 2. № 6. С. 169-173.
73. **Суванова Ф.У.** Применение адсорбентов для переработки хлопкового масла и мисцеллы. *Актуал. Науч. исслед. в соврем. мире.* 2016. Т. 13. № 5-2. С. 130-134.
74. **Муслимов Б.Б., Исмаилов С.Ш., Шарифова Н.А.** Отбельные технологии рафинации хлопкового масла. *Вопр. науки и образования.* 2017. № 5 (6). С. 11-13.
75. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Smirnov K.V., Shushkina E.A., P'in A.P.** Extrusion molding of kaolin sorbents. *Glass and Ceramics.* 2007. V. 64. N 7-8. P. 287-290.
76. **Захаров О.Н., Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Разина Ж.В.** Формование сорбента из модифицированной глины месторождений Ивановской области. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2009. Т. 52. Вып. 2. С. 87-90.
77. **Zakharov Yu.A., Motygullin E.K., Gil'mutdinov A.Kh.** Direct determination of phosphorus in vegetable oils by electrothermal atomic absorption spectrometry. *J. Anal. Chem.* 2000. V. 55. N 7. P. 649-652.

Поступила в редакцию 11.09.2020

Принята к опубликованию 12.10.2020

## REFERENCES

1. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Gordina N.E.** The adsorption of undesirable impurities from sunflower oil the





- granulated sorbents based on caolin clay. *Int. J. Food Eng.* 2014. V. 10. N 4. P. 713-720.
2. **Razgovorov P.B., Sitanov S.V., Kozlov V.A.** Investigation of interaction of some priming (fuse) materials and ester component of wax-like compounds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2002. T. 45. N. 1. P. 34-37 (in Russian).
  3. **Razgovorov P.B., Sitanov S.V.** Express analysis of waxes in vegetable oils. *Maslozhir. promyshl.* 2009. N 3. P. 21-23 (in Russian).
  4. **Razgovorov P.B., Gorshkov V.K.** Processing equipment of industry: calculations in oil and fat productions: tutorial. Ivanovo: ISUCT. 2009. 48 p. (in Russian).
  5. **Lygina T.Z., Mikhailova O.A.** Physico-chemical and adsorption methods for studying inorganic natural mineral sorbents: tutorial. Kazan: KSTU. 2009. 80 p. (in Russian).
  6. **Razgovorov P.B., Nagornov R.S., Razgovorova M.P.** Utilization of blue clay for separation of impurities from linseed oil. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 57. N 12. P. 72-75 (in Russian).
  7. **Lygina T.Z., Mikhailova O.A., Khatsrinov A.I., Konyukhova T.P.** Technology of chemical activation of inorganic natural mineral sorbents. Kazan: KSTU. 2009. 120 p. (in Russian).
  8. **Lukomskiy Yu.Ya., Gorshkov V.K., Razgovorov P.B.** Galvanic and paint coatings on aluminum and its alloys. Ivanovo: ISUCT. 2019. 239 p. (in Russian).
  9. **Bel'chinskaya L.I., Khodosova N.A., Novikova L.A., Strel'nikova O.Yu., Roessner F., Petukhova G.A., Zhabin A.V.** Regulation of sorption processes in natural nanoporous aluminosilicates. 2. Determination of the ratio between active sites. *Protect. Met. Phys. Chem. Surf.* 2016. V. 52. N 4. P. 599-606.
  10. **Grevtsev V.A., Lygina T.Z.** Morphological and structural features of natural, activated and synthesized substances. 2010. *Vestn. Kazan. technol. Univer.* 2010. No. 8. P. 236-249 (in Russian).
  11. **Goldberg V.M., Skvortsov N.P.** Permeability and filtration in clays. M.: Nedra. 1986. 160 p. (in Russian).
  12. **Shapkin N.P., Razov V.I., Khal'chenko I.G., Shkuratov A.L., Korochentsev V.V., Mayorov V.I.** Studies of natural kaolinite and its modified forms. *J. Inorg. Chem.* 2016. V. 61. N 11. P. 1463-1471.
  13. **Mikhailov G.G., Lonzingert M., Morozova A.G., Skotnikov V.A., Lonzingert A.V., Kutuev A.A.** Influence of composition and structure of natural aluminosilicate materials of the Chelyabinsk region their sorption properties. *Vestn. Yuzhn.-Ural. gos. Univer. Ser. Metallurgiya.* 2015. V. 15. N. 4. P. 42-50 (in Russian).
  14. **Sharafiev D.R., Hatsrinov A.I., Usmanov N.V., Kasymova G.I.** Modified natural adsorbents for refining of vegetable oils. *Vestn. technol. Univer.* 2017. V. 20. N. 18. P. 88-92 (in Russian).
  15. **Sabitov A.A., Ruselik E.S., Trofimova F.A., Teterin A.N.** Russian behtonite: the current state and prospects for the development of the resource base. *Mineral resources of Russia. Economics and management.* 2010. N. 5. P. 8-17 (in Russian).
  16. **Khodosova N.A., Pryazhentseva K.A., Zotova S.A.** Evaluation of sorption capacity of natural and acid-activated aluminosilicates of various structures. *Sci. Bullet. Voronezh. State Univer. Arch. Civil Eng. Ser. High technol. Ecology.* 2016. N. 1. P. 130-136 (in Russian).
  17. **Sapronova Zh.A., Gomez M.Zh., Svergunova S.V.** Ultraviolet activation of natural clays of Angolan deposits to increase their sorption activity in water treatment processes. Belgorod: BSTU. 2015. 157 p. (in Russian).
  18. **Tserenkhand B., Bolmaa G., Bayaraa B.** Chemical and mineralogical composition of some clays in uvnuuraimak (Mongolia). *Bullet. Buryat State Univer.* 2014. V. 3. P. 17-20 (in Russian).
  19. **Vezentzev A.I., Kormosh E.V., Zdorenko N.M., Goldovskaja-Peristaja L.F.** Adsorption properties of enrichment products of natural montmorillonite clays. *Nauch. ведомosti. Ser. Estestv. nauki.* 2011. N. 9. V. 15. P. 103-109.
  20. **Trezza M.A., Tironi A., Irassar E.F.** Thermal Activation of Two Complex Clays (Kaolinite-Pyrophyllite-Illite) from Tandilia System, Buenos Aires, Argentina. In book: *Calcined Clays for Sustainable Concrete.* 2018. P. 469-474
  21. **Ryazanov M.A., Dudkin B.N.** Acid-Base Properties of  $\gamma$ - $Al_2O_3$  Suspension Studied by pK Spectroscopy. *Colloid J.* 2003. V. 65. No 6. P. 761-766.
  22. **Razgovorov P.B., Nagornov R.S., Razgovorova M.P., Grechin O.V.** Regulation of aluminosilicate materials acid-base properties for action on purification degree of olive oil. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 10. P. 58-63 (in Russian).
  23. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B.** Physical and chemical processes occurring when introducing of kaolin clays in vegetable oils. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 2010. N. 2. P. 159-164 (in Russian).
  24. **Shcherbakov A.A., Klepikov M.S., Solodkii N.F., Serikov A.S., Rukavishnikov V.V., Zhestkov V.M., Belevitin V.A.** Chemical composition of the conditioned and nonconditioned Nignevlyskayas clay Chelyabinsk region. *Bashkir. Chem. J.* 2011. V. 18. N. 4. P. 236-239 (in Russian).
  25. **Lamberov A.A., Sitnikova E.Yu., Abdulganeeva A.Sh.** Influence of the composition and structure of kaolinite clays on the conditions of transition of kaolinite to metakaolinite. *Vestn. Kazan. technol. Univer.* 2011. N. 7. P. 17-23 (in Russian).
  26. **Chelly M., Srasra E.** Physico-chemical characterization and thermal behavior of two Tunisian kaolins. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 1. P. 47-55.
  27. **Kanygina O.N., Kravtsova O.S., Chetverikova A.G., Kuleeva A.H., Salnikova E.V., Volkov E.V., Shambulatova A.T.** Fractional structures of brick clays from Orenburzhye. *Vestn. Omsk. gos. Univer.* 2011. V. 131. N 12. P. 396-398 (in Russian).
  28. **Tardy Y., Fritz B.** An ideal solid solution model for calculating solubility of clay minerals. *Clay Minerals.* 1981. V. 16. N 4. P. 361-373.
  29. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Smirnov K.V., Ilyin A.P., Shushkina E.A.** Flax oil purification on a modified white clay. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2007. V. 50. N 6. P. 65-69 (in Russian).
  30. **Kumar P., Jasra R.V., Bhat T.S.G.** Evolution of Porosity and Surface Acidity in Montmorillonite Clay on Acid. *Indian Eng. Chem. Res.* 1995. N 34. P. 1440-1448.
  31. **Nagornov R.S., Razgovorov P.B., Lepilova A.M., Stroganova Y.I., Smirnov P.R., Kochetkov S.P.** Gentle activation



- of polymineral sorbent and its influence on the process of cleaning oil-containing media from impurity ingredients. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 8. P. 53-59 (in Russian).
32. **Stroganov V.F., Amelchenko M.O.** Study the effect of acid activated kaolin on the properties of waterborne coatings. *Izv. KGASU.* 2014. V. 30. N 4. P. 284-290 (in Russian).
  33. **Yahaya S., Jikan S.S., Badarulzaman N.A., Adamu A.D.** Effects of Acid Treatment on the SEM-EDX Characteristics of Kaolin Clay. *Path Sci.* 2017. V. 9. N 3. P. 4001-4002.
  34. **Ming H., Spark K.M.** Radio Frequency Plasma-Induced Hydrogen Bonding on Kaolinite. *J. Phys. Chem.* 2003. V. 107. N 3. P. 694-702.
  35. **Kurtukova L.V., Somin V.A., Komarova L.F.** Changing the properties of bentonite clays under the action of various activators. *Polzunovskiy Vestn.* 2013. N. 1. P. 287-289 (in Russian).
  36. **Meldeshov A.A.** Adsorption descriptions of the activated Keles clay. *Bullet. of Kazakh. Acad. transport and communication. M. Tynyshpaeva.* 2017. V. 101. N 2. P. 48-52 (in Russian).
  37. **Vorsina L.A., Grigor'eva T.F., Devyatkina E.T., Vosmerikov S.V., Udalova T.A., Lyakhov N.Z.** Interaction of organic acids with silicates in the course of joint mechanical activation. *J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 3. P. 334-341.
  38. **Tuchkova A.I., Tyupina E.A., Rakhimov M.G.** Influence of alkaline activation of clay minerals on their sorption ability to extract Cs-137 from spent oil. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. XXVI. N 6. P. 92-95 (in Russian).
  39. **Bel'chinskaya L.I., Voishcheva O.V., Khokhlov V.Y., Lu T.Y., Zhabin A.V., Petukhova G.A.** The influence of alkaline treatment on the chemical composition and adsorption-structural characteristics of mineral nanoporous sorbent M<sub>45</sub>K<sub>20</sub>. *Protect. Met. Phys. Chem. Surf.* 2012. V. 48. No 3. P. 322-327.
  40. **Zhdanov S.P., Egorova E.N.** Chemistry of zeolites. L.: Nauka. 1968. 158 p. (in Russian).
  41. **Lebedev M., Zhernovskiy I., Strokova V.** Effect of Heat Treatment on Phase Compositions of Clay Aluminosilicates. *Nanotechnology in Construction.* 2015. P. 123-129.
  42. **Trofimova F.A., Gubaidullina A.M., Demidova M.I.** The degree of dispersion as one of the criteria for the quality of natural aluminosilicates. *Vestn. Kazan. tekhnol. Univer.* 2010. N 6. P. 218-224 (in Russian).
  43. **Kalinkin A.M., Kalinkina E.V., Zalkind O.A.** Mechano-sorption of carbon dioxide by Ca- and Mg-containing silicates and aluminosilicates. Sorption of CO<sub>2</sub> and structure-related chemical changes. *Colloid J.* 2009. V. 71. No 2. P. 185-192.
  44. **Zulumyan N.H., Papakhchyan L.R., Isahakyan A.R., Beglaryan H.A., Aloyan S.G.** Effect of mechanical treatment on the silicate lattice of kaolinite. *J. Phys. Chem.* 2012. V. 86. No 12. P. 1887-1891.
  45. **Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Arbuznikov V.V., Agafonov A.V.** Synthesis and properties of Al-pillared montmorillonite of natural origin. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 8. P. 73-77 (in Russian).
  46. **Akkari R., Srasra E.** Polybenzidine-montmorillonite nanocomposites: synthesis via a mechanochemical intercalation method. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2010. V. 46. N 4. P. 361-366.
  47. **Arfaoui S., Frini-Srasra N., Srasra E.** Synthesis and characterization of hydroxy-chromium pillared bentonite. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 3. P. 239-245.
  48. **Hlihor R. M., Gavrilesco M.** Removal of some environmentally relevant heavy metals using low-cost natural sorbents. *Environ. Eng. and Manag. J.* 2009. V. 2. N 8. P. 353-372.
  49. **Mulyutin V.V., Gelis V.M., Nekrasova N.A., Kononenko O.A., Vezentsev A.I., Volovicheva N.A., Korol'kova S.V.** Sorption of Cs, Sr, U, and Pu radionuclides on natural and modified clays. *Radiochem.* 2012. V. 54. N 1. P. 75-78 (in Russian).
  50. **Ayari F., Srasra E., Trabelsi-Ayad M.** Effect of exchangeable cations on the physicochemical properties of smectite. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2007. V. 43. I. 5. P. 369-378.
  51. **Teng M.-Y., Lin S.-H.** Removal of basic dye from water onto pristine and HCl-activated montmorillonite in fixed beds. *Desalination.* 2006. V. 194. I. 1-3. P. 156-165.
  52. **Timofeev K.L., Maltsev G.I., Sviridov A.V.** Indium extraction from solutions with modified aluminosilicates. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 7. P. 35-41 (in Russian).
  53. **Patel M.A., Kar A.S., Kumar S., Tomar B.S.** Effect of phosphate on sorption of Eu (III) by montmorillonite. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2017. V. 313. N 3. P. 537-545.
  54. **Zhou Q., Pan G., Shen W.** Enhanced sorption of perfluorooctane sulfonate and Cr (VI) on organomontmorillonite: Influence of solution pH and uptake mechanism. *Adsorption.* 2013. V. 19. N 2-4. P. 709-715.
  55. **Goyal S., Goyal G.K.** Nanotechnology in food packaging – a critical review. *Rus. J. Agricult. and Soc.-Econ. Sci.* 2012. V. 10. N 10. P. 10-24.
  56. **Mattia C.D., Paradiso V.M., Andrich L., Giarnetti M., Caponio F., Pittia P.** Effect of Olive Oil Phenolic Compounds and Maltodextrins on the Physical Properties and Oxidative Stability of Olive Oil O/W Emulsions. *Food Biophys.* 2014. V. 9. N 4. P. 396-405.
  57. **Aladedunye F.A., Przybylski R.** Frying Performance of Canola Oil Triacylglycerides as Affected by Vegetable Oils Minor Components. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 2012. V. 89. N 1. P. 41-53.
  58. **Razgovorov P.B.** Extraction of waxes from oil-containing systems in the presence of sorbents and emulsifiers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2006. V. 49. N 5. P. 3-10 (in Russian).
  59. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Razgovorova M.P.** Studying of waxes crystal formation process in vegetable oils in the presence of primed mineral additives. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 2013. N 2. P. 207-212 (in Russian).
  60. **Gerasimenko E.O.** Patent RU N 2174993. 2001.
  61. **Nasedkin V.V., Boeva N.M., Garbuzova I.A., Koval'chuk M.V., Vasil'iev A.L.** The crystal structure and chemistry of several palygorskite samples with different geneses. *Crystallogr. Reports.* 2009. V. 54. N 5. P. 884-900.
  62. **Sabitov A.A., Galiakhmetov R.G., Trofimova F.A., Ruselik E.S., Nikolaeva L.M.** Sepiolite clays of Meteger origin (Republic of Sakha (Yakutia)) – a new type of nonmetallic raw material in Russia. *Razvedka i ohrana nedr.* 2015. N. 4. P. 29-34 (in Russian).
  63. **Singer A., Galan E.** Developments in Palygorskite-Sepiolite Research. A New Outlook of these Nanomaterials. Elsevier: Oxford-Amsterdam. 2011. 520 p.



64. **Ismatov S.Sh., Khudoerov D.U.** Effects of local adsorbents for cleaning cotton oil and products of its processing. *Vopr. nauki i obrazovaniya*. 2017. N 1.P. 45-46 (in Russian).
65. **Hechi E., Amor O.B., Srasra E., Zargouni F.** Physico-chemical characterization of acid-activated clay: its industrial application in the clarification of vegetable oils. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009. V. 45. N 2. P. 140-144.
66. **Laatikainen M., Srithammavut W., Toukoniitty B., Turunen I., Sainio T.** Phospholipid adsorption from vegetable oils on acid-activated sepiolite. *Adsorption*. 2015. V. 21. N 5. P. 409-417.
67. **Essid K., Jahwach-Rabai W., Trabelsi M., Frikha M.H.** Sterolic Composition of Neutralized Oils Bleached with Clays Activated with Ultrasound. *Iran. J. Sci. Technol. Transact. A: Sci.* 2016. V. 40. N 3. P. 183-189.
68. **Su H., Wang X., Kim Y.G., Kim S.B., Seo Y.-G., Kim J.S., Kim C.-J.** Optimization of decoloring conditions of crude fatty acids recovered from crude glycerol by acid-activated clay using response surface method. *Korean J. Chem. Eng.* 2014. V. 31. N 11. P. 2070-2076.
69. **Hechi A.E., Srasra E., Zargouni F.** Physico-chemical characterization of acid-activated clay: its industrial application in the clarification of vegetable oils. *Mater. Sci. Ind. J.* 2007. V. 3. I. 3. P. 146-149.
70. **Chakroun S., Herchi M., Mechti W., Gaied M.E.** Acid activation of upper Eocene Ca-bentonite for soybean oil clarification. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2017. V. 24. N 28. P. 22557-22569.
71. **Yoon S.H.** Optimization of the refining process and oxidative stability of chufa (*Cyperus esculentus* L.) oil for edible purposes. *Food Sci. Biotechnol.* 2016. V. 25. N 1. P. 85-90.
72. **Paranuk A.A., Khrisonidi V.A., Ponomareva G.V., Guchetl Z.Ch., Lysenko Yu.A.** Development of oil drying installation on zeolites. *Usp. sovrem. nauki*. 2017. V. 2. N. 6. P. 169-173 (in Russian).
73. **Suvanova F.U.** Application of adsorbents for processing cottonseed oil and miscella. *Aktual. nauchn. issled. v sovrem. mire*. 2016. V. 13. N. 5-2. P. 130-134 (in Russian).
74. **Muslimov B.B., Ismatov S.Sh., Sharifova N.A.** Selected technologies for cottonseed oil refining. *Vopr. nauki i obrazovaniya*. 2017. N. 5 (6). P. 11-13 (in Russian).
75. **Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Smirnov K.V., Shushkina E.A., Il'in A.P.** Extrusion molding of kaolin sorbents. *Glass and Ceramics*. 2007. V. 64. N 7-8. P. 287-290.
76. **Zakharov O.N., Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Razina Zh.V.** Sorbent forming from modified clay of Ivanovo region field. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2009. V. 52. N 2. P. 87-90 (in Russian).
77. **Zakharov Yu.A., Motygullin E.K., Gil'mutdinov A.Kh.** Direct determination of phosphorus in vegetable oils by electrothermal atomic absorption spectrometry. *J. Anal. Chem.* 2000. V. 55. N 7. P. 649-652.

Received 11.09.2020

Accepted 12.10.2020



УДК 691:620.17

# *АНАЛИЗ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ, ЭКСПОНИРОВАННЫХ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО- КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА*

*Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева,  
Д.А. Артамонов*

*Татьяна Анатольевна Низина*

*E-mail: nizinata@yandex.ru*

*Владимир Павлович Селяев*

*E-mail: ntorm80@mail.ru*

*Дмитрий Рудольфович Низин*

*E-mail: nizindi@yandex.ru*

*Надежда Сергеевна Канаева*

*E-mail: aniknadya@yandex.ru*

*Денис Александрович Артамонов*

*E-mail: denartam@gmail.com*

*Кафедра строительных конструкций, Национальный  
исследовательский Мордовский государственный университет им.  
Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, 68, Саранск, Российская  
Федерация, 430005*



В работе на примере двух видов полимерных композитов, значительно различающихся климатической стойкостью, проанализирована кинетика накопления повреждений при экспонировании в условиях умеренно-континентального климата. Сущность предложенной методики заключается в анализе изменения индекса фрактальности, определяемого с помощью метода наименьшего покрытия по кривым деформирования при растяжении, фиксируемым с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.). Числовые значения индексов фрактальности определялись из анализа предшествующего временного участка, соответствующего 16 ( $2^4$ ) экспериментальным точкам, т.е. 0,16 сек. Уровни «критических» состояний соответствовали минимальным значениям индексов фрактальности, ранжированных для исследуемых кривых деформирования от начала нагружения до уровня достижения образцами максимальных растягивающих напряжений. Натурное климатическое старение исследуемых полимеров проводилось в течение одного календарного года. Фиксация изменения упруго-прочностных характеристик образцов проводилась через 45, 90, 180, 270 и 360 суток.

На основе проведенного исследования выявлены существенные различия в кинетике накопления повреждений эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений, в том числе в зависимости от вида эпоксидной смолы и отвердителя, а также длительности натурального экспонирования. Установлено, что для климатически нестойких составов уже после 180 суток климатического воздействия наблюдается группирование «критических» точек в ансамбли, близкие по времени, уровню напряжений и относительных удлинений при растяжении. Для климатически стойких полимеров, напротив, наблюдается более равномерное распределение «критических» точек по кривым деформирования, что, очевидно, позволяет им успешно перераспределять возникающие перенапряжения на работоспособные структурные элементы и, как следствие, воспринимать значительно большие уровни растягивающих нагрузок и относительных деформаций.

**Ключевые слова:** эпоксидные полимеры, кривые деформации, накопление повреждений, фрактальный анализ, метод минимального покрытия

**Для цитирования:**

Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Канаева Н.С., Артамонов Д.А. Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях умеренно-континентального климата. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 27-35 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_27



UDC 691:620.17

# *KINETICS OF DAMAGE ACCUMULATION IN THE STRUCTURE OF EPOXY POLYMERS EXPOSED IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE*

*T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva, D.A. Artamonov*

*Tatyana A. Nizina*

*E-mail: nizinata@yandex.ru*

*Vladimir P. Selyaev*

*E-mail: ntorm80@mail.ru*

*Dmitry R. Nizin*

*E-mail: nizindi@yandex.ru*

*Department of Building structures, National Research Mordovia State  
University, 68, Bolshhevistskaya St., Saransk, 430005, Russia*

*Nadezhda S. Kanaeva*

*E-mail: aniknadya@yandex.ru*

*Denis A. Artamonov*

*E-mail: denartam@gmail.com*



*The study deals with the kinetics of damage accumulation during exposure in a temperate climate. The research uses two types of polymer composites of significantly different climatic resistance as an example. The proposed method is the analysis of changes in the fractality index determined by the least-coverage method by tensile strain curves recorded with a high reading frequency (0.01 sec.). The fractality indices were calculated by analyzing the preceding time section that corresponds to 16 (24) experimental points, i.e., 0.16 sec. The levels of "critical" states corresponded to the minimum values of fractality indices ranged for the studied deformation curves from the beginning of loading to the level of reaching maximum tensile stresses by the specimens. The study included a field experiment on climatic aging of the studied polymers for one calendar year. We have recorded the changes in the elastic-strength characteristics of the samples after 45, 90, 180, 270 and 360 days.*

*The results of the study showed significant differences in the damage accumulation kinetics of epoxy polymers impacted by tensile stresses, including those depending on the type of epoxy res-in and hardener, as well as the duration of full-scale exposure. It was found that for climatically unstable compositions after just 180 days of climatic there is a grouping of "critical" points into ensembles similar in time, stress level, and relative elongation after stretching. At the same time, the climatic resistant polymers have a more uniform distribution of "critical" points along the deformation curves, which obviously allows them to successfully redistribute the occurring overstresses onto the workable structural elements and, consequently, to accept significantly higher levels of tensile loads and relative deformations.*

**Key words:** *epoxy polymers, strain curves, damage accumulation, fractal analysis, minimum coverage method*

**For citation:**

*Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Artamonov D.A. Kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymers exposed in a temperate continental climate. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 27-35 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_27



## ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения надежной эксплуатации строительных изделий и конструкций, подвергаемых натурному климатическому воздействию, становится все более актуальной год от года. Рост негативного влияния факторов окружающей среды (солнечная радиация, загрязняющие вещества, перепады температуры и влажности, ветровые нагрузки и т.д.) приводит к необходимости защиты элементов зданий и сооружений с целью повышения их долговечности.

Применительно к бетонным и железобетонным изделиям и конструкциям наиболее эффективным способом защиты является использование покрытий на основе полимерных материалов. Однако, в процессе натурной эксплуатации в условиях комплексного воздействия климатических факторов происходит старение полимерных композитов, сопровождаемое накоплением в структуре покрытий микрорезов и повреждений, приводящих со временем к разрушению. Поэтому при разработке составов защитных полимерных покрытий необходимо учитывать их климатическую стойкость, оценку которой целесообразно проводить на основе результатов натурных испытаний.

Активное внедрение в последние годы в практику научных исследований современного испытательного оборудования, оснащенного программным обеспечением, представляющим собой высокоточную систему сбора и регистрации результатов, приводит к накоплению больших объемов экспериментальных данных, для обработки и анализа которых требуется применение специально разработанных методик. В частности, при испытании композиционных материалов как на сжатие [1, 2], так и на растяжение [3, 4] идет фиксация данных с частотой в 0,01 сек., что позволяет получать для каждого образца, в зависимости от скорости нагружения и его прочностных показателей, объемы данных, содержащих, в среднем, от 1,5 до 150 тыс. строк [5]. Разработка полученных массивов данных, в том числе с привлечением методов фрактального исчисления, позволяет получить новую ценную информацию о процессе деформирования, а также разработать методики оценки количественных значений «критических» точек процесса нагружения композиционных материалов под действием механических нагрузок, что, без сомнения, является важной материаловедческой задачей.

Характерной особенностью полимерных композиционных материалов является наличие сложной многоуровневой структуры, приводящей к существенным различиям в характере разрушения различных видов полимеров [6]. В научной литературе приводятся исследования влияния степени структурной неоднородности композиционных материалов на их поведение под действием статических и ударных нагрузок. Показано [7], что именно высокая степень структурной неоднородности полимеров, заложенная на этапе формирования, является ключевым фактором, влияющим на его физико-механические свойства. В частности, при динамическом деформировании в материале возникает развитая иерархия структурных уровней деформации, которая обуславливает самосогласованное деформирование и разрушение всего объема материала. В работе [8] доказано, что при изучении процессов деформирования и разрушения полимеров в рамках методологии физической

мезомеханики необходимо учитывать иерархию структурных уровней и связанную с ней иерархию масштабных уровней концентраторов напряжений, возникающих при их нагружении.

Именно структурная неоднородность композиционных строительных материалов даже при относительно небольших уровнях механических напряжений может приводить к разрыхлению ослабленных зон, с которых впоследствии и начинается разрушение композитов. При этом процесс разрушения имеет дискретно-непрерывный характер, развивающийся во времени, характеризующийся протеканием множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов вплоть до появления макротрещин, приводящих к разрушению образца [9-13].

В авторских исследованиях [1-5, 14] для анализа процесса нагружения различных композитов под действием механических нагрузок предложен алгоритм, основанный на использовании метода фрактального анализа временных рядов, получаемых с высокой частотой фиксации показаний, позволяющий количественно определять координаты «критических» точек кривых деформирования, свидетельствующих о возникновении в структуре композитов определенных «трудностей» (точек бифуркации). Для определения изменения значений индексов фрактальности, позволяющих выявлять «критические» уровни напряжений и деформаций в процессе нагружения строительных композитов, предложено использовать метод наименьшего покрытия, изложенный в работах [15, 16], являющийся наиболее легко реализуемым даже для временных рядов больших объемов.

В данной работе на примере двух видов полимерных композитов, значительно отличающихся по уровню климатической стойкости в условиях умеренно-континентального климата, будут проанализированы различия в кинетике накопления повреждений, оцениваемой по изменению индексов фрактальности временных рядов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика определения координат «критических» точек кривых деформирования полимерных образцов в процессе нагружения изложена в работах [5, 14]. Для определения индекса фрактальности  $\mu$  при анализе участка кривой деформирования полимерных композитов использовалась последовательность  $m$  вложенных разбиений, где  $m = 2^n$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, 4$ . При этом для каждой точки кривой деформирования исследовался предшествующий временной интервал, соответствующий 16 ( $2^4$ ) экспериментальным точкам, т.е. 0,16 с. После завершения анализа первого участка обработки осуществлялся переход к следующему, смещенному относительно предыдущего на 0,01 с. Каждое разбиение состояло из  $2^n$  интервалов, содержащих  $2^{4-n}$  экспериментальных точек. Для каждого разбиения

$$\omega_m = [a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b],$$

в зависимости от шага  $\delta$  ( $\delta = (b - a)/m$ ) вычисляли амплитудную вариацию  $V_f(\delta)$  по формуле [15, 16]:

$$V_f(\delta) = \sum_{i=1}^m K_i(\delta), \quad (1)$$





где  $K_f(\delta)$  определяли как разницу между максимальным и минимальным приростом напряжения при растяжении на временном интервале  $[t_{i-1}, t_i]$ . В данном случае точка "а" характеризует начало исследуемого участка длиной 0,16 с, точка "б" – его окончание.

По коэффициенту  $\beta$  уравнения регрессии  $\log(V_f(\delta)) = \alpha_0 + \beta \times \log(\delta)$ , определенному с помощью метода наименьших квадратов, определяли индекс фрактальности и размерность минимального покрытия для каждого исследуемого участка:

$$\mu = -\beta; D_\mu = 1 + \mu. \quad (2)$$

Расчет индексов фрактальности кривых деформирования производился с помощью авторского программного продукта, реализованного на языке Python.

В качестве объектов исследования были выбраны полимеры, получаемые на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отверждаемой отвердителем Этал-1460 (ТУ 2257-010-18826195-99), а также модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой Этал-1472 (ТУ 2257-1472-18826195-05). Используемые отвердители представляют собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов. Массовые доли эпоксидных групп для смол ЭД-20 и Этал-247 близки и составляют, соответственно, 20,0-22,5 % и 21,4-22,8 %. При этом вязкость модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 в 20-22 раза ниже, чем у ЭД-20, что является положительным фактом при использовании данных составов в качестве защитных покрытий бетонных и железобетонных строительно-технических конструкций.

Разработанная методика по определению количественных характеристик диаграмм деформирования полимерных композитов при растяжении, основанная на использовании метода фрактального анализа временных рядов, была применена для исследования процесса нагружения эпоксидных полимеров растягивающей нагрузкой как в контрольном состоянии, так и после 45, 90, 180, 270 и 360 суток климатического старения.

Натурное экспонирование образцов проводилось на испытательных стендах научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева (Саранск) с 1 декабря в течение одного календарного года. Для проведения механических испытаний составов полимерных композитов на растяжение использовалась разрывная машина серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Частота фиксации значений напряжений и деформаций составляла 0,01 сек. Испытания проводились на образцах «восьмерках» (тип 2) в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» при температуре  $23 \pm 2$  °C и относительной влажности воздуха  $50 \pm 5$  %. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин.

На основе экспериментальных исследований установлено (см. табл.), что прочностные характеристики полимера ЭД-20 + Этал-1460 характеризуются резким снижением прочностных и деформативных показателей уже к 180 суткам натурального экспонирования.

**Таблица. Изменение упруго-прочностных показателей эпоксидных полимеров в процессе натурального климатического старения в условиях умеренно-континентального климата**

**Table. Changes in the elastic-strength parameters of epoxy polymers in the process of natural climate aging in a temperate continental climate**

Длительность натурального экспонирования, сутки	Упруго-прочностные показатели эпоксидных полимеров			
	ЭД-20 + Этал-1460		Этал-247 + Этал-1472	
	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %
0	<u>47,16</u> 1,00	<u>8,18</u> 1,00	<u>50,92</u> 1,00	<u>10,76</u> 1,00
45	<u>42,67</u> 0,90	<u>6,43</u> 0,79	<u>50,80</u> 1,00	<u>8,76</u> 0,81
90	<u>34,98</u> 0,74	<u>4,23</u> 0,52	<u>51,28</u> 1,01	<u>8,55</u> 0,79
180	<u>16,37</u> 0,35	<u>1,40</u> 0,17	<u>53,36</u> 1,05	<u>8,39</u> 0,78
270	<u>12,56</u> 0,27	<u>1,07</u> 0,13	<u>49,00</u> 0,96	<u>7,63</u> 0,71
360	<u>14,52</u> 0,31	<u>1,22</u> 0,15	<u>50,83</u> 1,00	<u>8,50</u> 0,79

Примечание \* в числителе приведены абсолютные значения, в знаменателе – относительные.

При этом полимер на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемый Этал-1472, практически не меняет своих прочностных показателей даже через год натурального экспонирования. Представленные в таблице данные получены по результатам статистической обработки 12 параллельно-испытанных образцов исследуемых полимеров.

Типичный пример получаемых по авторской методике графических зависимостей изменения индекса фрактальности кривой деформирования образца эпоксидного полимера (ЭД-20 + Этал-1460, 0 сут.) представлен на рис. 1. Координаты «критических» точек, соответствующих наименьшим уровням индексов фрактальности, выделены кружочками красного (№ 1, 2) и желтого цветов (№ 3-15). В данном исследовании область анализа ограничивалась точкой на кривой деформирования, соответствующей уровню достижения образцом максимальных растягивающих напряжений.

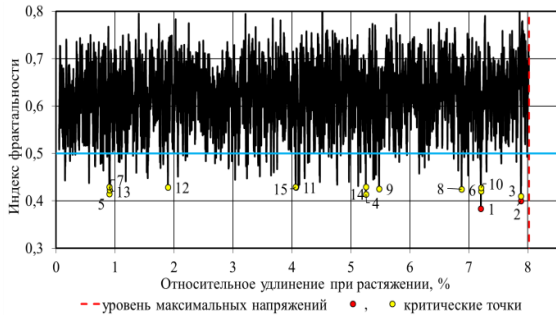
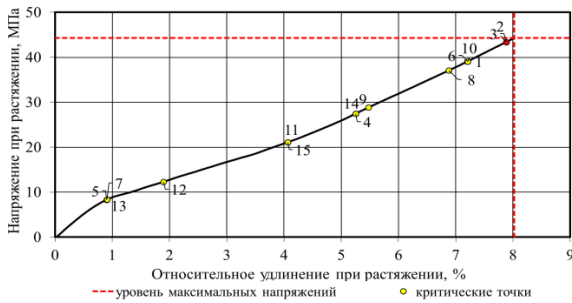


Рис. 1. Изменение индекса фрактальности кривой деформирования образца эпоксидного полимера ЭД-20+Этал-1460 при растяжении в зависимости от относительного удлинения при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа  
Fig. 1. Change in the fractal index of the deformation curve sample of Ed-20+Etal-1460 epoxy polymer under tension depending on the relative elongation at tension with the applied critical points defined by fractal analysis

a



б

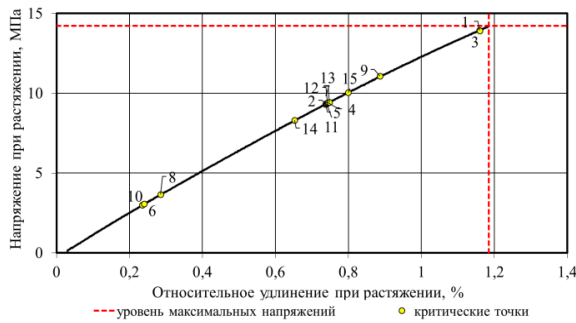
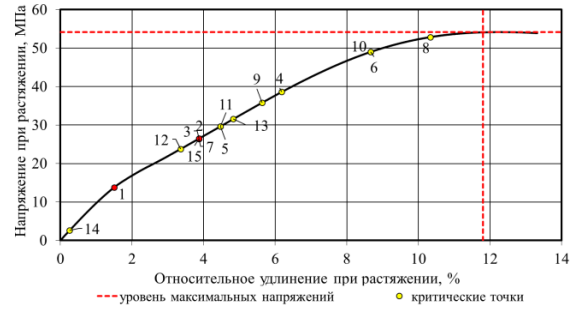


Рис. 2. Кривые деформирования полимера состава ЭД-20 + Этал-1460 при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа: а – 0; б – 360 сут. натурального экспонирования  
Fig. 2. The curves of deformation of a polymer composition Ed-20 + Etal-1460 when stretched with «critical» points applied, defined by the fractal analysis method: а – 0; б – 360 days of full-scale exposure

a



б

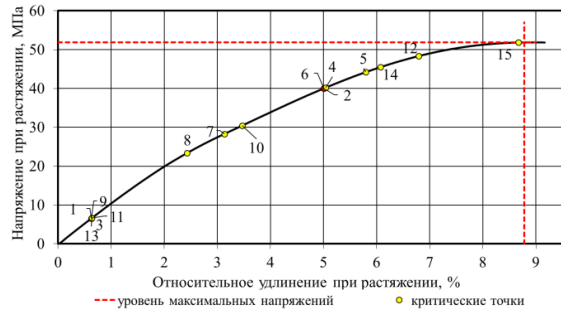


Рис. 3. Кривые деформирования полимера состава Этал-247 + Этал-1472

при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа:  
а – 0; б – 360 сут. натурального экспонирования  
Fig. 3. The curves of deformation of a polymer composition Etal-247 + Etal-1472 when stretched with «critical» points applied, defined by the fractal analysis method:  
а – 0; б – 360 days of full-scale exposure

Кривые деформирования с нанесенными на них «критическими» точками для двух вышеперечисленных составов в исходном состоянии и через 360 сут. натурального экспонирования приведены на рис. 2, 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа представленных данных наглядно видно, что экспонирование образцов эпоксидных полимеров в условиях воздействия природных факторов приводит к охрупчиванию, выражаемому в данном случае в снижении относительного удлинения при растяжении (см. табл., рис. 2, 3). При этом, если для полимера состава Этал-247 + Этал-1472 через 360 суток натурального экспонирования наблюдается (рис. 3) снижение деформативности на 21 %, то для полимера ЭД-20 + Этал-1460 – от 8,18 до 1,22 %, т.е. более, чем в 6,5 раз (рис. 2), причем уменьшение относительного удлинения почти на 50 % наблюдается уже к 90 суткам натурального экспонирования (см. табл.).

Перенос критических точек, определенных с помощью разработанного метода фрактального анализа, на кривые « $\sigma - \epsilon$ » позволил наглядно проследить наиболее критические уровни напряжений и деформаций (рис. 2, 3). Комплексный анализ полученных на всех временных интервалах климатического старения данных свидетельствует о более равномерном распределении «критических» точек в процессе нагружения образцов, обладающих более высоким



комплексом свойств. Данный процесс накопления повреждений наиболее характерен для контрольных образцов (до климатического воздействия), а также климатически стойких полимеров, в частности, Этал-247 + Этал-1472 (рис. 2,а, 3). При этом концентрация нескольких точек бифуркации на близких временных участках приводит к лавинообразному разрушению образцов при малых деформациях и уровнях разрушающих нагрузок. Типичным примером таких процессов служат кривые деформирования для состава ЭД-20 + Этал-1460, определенные на образцах не только после года натурального экспонирования (рис. 2,б), а уже через 180 и 270 суток. Кроме того, для ряда исследуемых партий образцов выявлена вариативность «критических» уровней напряжений и деформаций в зависимости от исследуемого образца, что, предположительно, связано с существованием в структуре «особых» образцов пор и первичных дефектов.

### ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показали, что для получения наиболее объективной картины о процессе накопления повреждений в структуре полимерных композитов различных составов, в том числе и в ходе климатического старения, необходимо проводить статистическую обработку результатов всех исследуемых образцов одной серии. При этом наибольшая частота фиксации минимальных значений индекса фрактальности для определенных уровней относительного удлинения и напряжений при растяжении будет свидетельствовать о достижении критических состояний полимеров. Предложенный подход для исследования механизма деформирования композиционных материалов при растяжении, осуществляемый на основе метода фрактального анализа кривых деформирования, регистрируемых с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой, позволяет получить ценную информацию о процессе накопления в его структуре микро- и макродефектов, приводящих к разрушению композитов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050 А «Исследование влияния интенсивности воздействия климатических факторов на характер разрушения полимерных композитов и прогнозирование их долговечности в условиях натурального воздействия».

\* This work was supported by the RFBR grant No. 18-08-01050.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В.П., Низина Т.А., Бальков А.С., Низин Д.Р., Балбалин А.В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии. Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2016. №1. С. 129-146. DOI: 10.15593/perm.tech/2016.1.09.
2. Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Korovkin D.I. Using fractal analysis methods in studying mechanisms of deformation and destruction of nano-modified cement concretes. Int. J. Nanotechn. 2019. 16 (6/7/9/10). P. 484-495. DOI: 10.1504/IJNT. 2019. 106620.
3. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Balykov A.S., Korovkin D.I., Kanaeva N.S. Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture. IOP Conf. Series: Mat. Sci. Eng. 2018. V 456 (1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
4. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artyamonov D.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. Key Eng. Mat. 2019. N 799. P. 217-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
5. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Канаева Н.С. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении. Стр-во и реконструкция. 2020. №2. С. 77-89. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-77-89.
6. Аскадский А.А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия. 1983. 248 с
7. Стужляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В., Марущак П.О., Мороз К.М., Полтаранин М.А., Вухерер Т., Корниенко Л.А., Люшкин Б.А. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении. Физ. мезомеханика. 2014. Т. 17. № 2. С. 65-83.
8. Клошниченко А.Б., Панин С.В., Старцев О.В. Исследование деформации и разрушения на мезо- и макромасштабном уровнях армированных пластиков при статическом и циклическом растяжении. Физ. мезомеханика. 2002. Т. 5. № 3. С. 101-116.
9. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука. 1994. 384 с.
10. Зайцев Ю.В. Моделирование деформации и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат. 1982. 196 с.
11. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В. Фрактальные модели разрушения бетона. Регион. архитектура и стр-во. 2015. № 1. С. 11-22.
12. Селяев В.П., Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л., Селяев В.В. Статистическая модель дискретно-непрерывного (квантового) механизма разрушения фрактальной структуры цементных композитов. Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: мат. Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева В.П. (3-5 дек. 2019 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2019. С. 308-317.
13. Трауш В.И., Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов. Пром. и граждан. стр-во. 2016. № 9. С. 94-100.
14. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артымонов Д.А., Канаева Н.С. Фрактальный анализ кривых деформирования эпоксидных полимеров при растяжении. Полимеры в стр-ве. 2019. № 1 (7). С. 48-57.
15. Dubovikov M.M., Starchenko N.S. Variation index and its applications to analysis of fractal structures. Sci. Alm. Gordon. 2003. N 1. P. 1-30.



16. **Dubovikov M.M., Starchenko N.S., Dubovikov M.S.** Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Phys. A.* 2004. N 339. P. 591-608. DOI:10.1016/j.physa.2004.03.025.

Поступила в редакцию 11.09.2020

Принята к опубликованию 12.10.2020

## REFERENCES

- Selyaev V.P., Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Balbalin A.V.** Fractal analysis of deformation curves of fiberreinforced fine-grained concretes under compression. *PNRPU Mech. Bulletin.* 2016. N 1. P. 129-146. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.09 (in Russian).
- Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Korovkin D.I.** Using fractal analysis methods in studying mechanisms of deformation and destruction of nano-modified cement concretes. *Int. J. Nanotechn.* 2019. 16 (6/7/9/10). P. 484-495. DOI: 10.1504/IJNT.2019.106620
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Balykov A.S., Korovkin D.I., Kanaeva N.S.** Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 2018. V 456 (1):012058. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
- Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A.** Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. *Key engineering materials.* 2019. N 799. P. 217-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Kanaeva N.S.** Quantitative analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tension. *Construction and reconstruction.* 2020. N 2. P. 77-89. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-77-89 (in Russian).
- Askadsky A.A., Matveev Yu.I.** Chemical structure and physical properties of polymers. Moscow: Chemistry. 1983. 248 p. (in Russian).
- Stukhlyak P.D., Buketov A.V., Panin S.V., Marushchak P.O., Moroz K.M., Poltaranin M.A., Vukherer T., Kornienko L.A., Lyukshin B.A.** Structural levels of destruction of epoxy composite materials under impact loading. *Fiz. mezomekhanika.* 2014. N 2. P. 65-83 (in Russian).
- Klyushnichenko A.B., Panin S.V., Startsev O.V.** Investigation of deformation and fracture at meso- and macroscale levels of reinforced plastics under static and cyclic tension. *Fiz. mezomekhanika.* 2002. V. 5. N 3. P.101-116 (in Russian).
- Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A.** *Synergetics and fractals in science of materials.* Moscow: Nauka. 1994. 384 p. (in Russian).
- Zaitsev Yu.V.** Modelling of deformation and strength of the concrete by methods fracture mechanics. Moscow: Stroyizdat. 1982. 196 p. (in Russian).
- Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Neverov V.A., Selyaev P.V.** Fractal models of destruction of concretes. *Reg. architecture and construction.* 2015. N 1. P. 11-22 (in Russian).
- Selyaev V.P., Bezrukova E.S., Kechutkina E.L., Selyaev V.V.** Statistical model of discrete-continuous (quantum) mechanism of fractal structure destruction of cement composites. *Durability of building materials, products and structures: mat. Rus. sci. techn. conf. Saransk: Izd-vo Mord. un-ta.* 2019. P. 308-317 (in Russian).
- Travush V.I., Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L.** On the possible quantum nature of the deformation and fracture of composites. *Industr. and civil construction.* 2016. N 9. P. 94-101 (in Russian).
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Artamonov D.A., Kanaeva N.S.** Fractal analysis of deformation curves of epoxy polymers under tension. *Polymers in construction.* 2019. N 1. P. 48-57 (in Russian).
- Dubovikov M.M., Starchenko N.S.** Variation index and its applications to analysis of fractal structures. *Sci. Alm. Gordon.* 2003. N 1. P. 1-30.
- Dubovikov M.M., Starchenko N.S., Dubovikov M.S.** Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Physica A.* 2004. N 339. P. 591-608. DOI:10.1016/j.physa.2004.03.025.

Received 11.09.2020

Accepted 12.10.2020



UDC 687.386

# ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE FLOORS WITH REGARD TO ADAPTATION TO SPECIAL EFFECTS

**A.L. Balushkin**

*Aleksandr Leonidovich Balushkin*  
E-mail: [balushkinal@ystu.ru](mailto:balushkinal@ystu.ru)

*Department of Building structures, Yaroslavl State Technical University,  
40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia*

*The paper discusses the features of the calculation of reinforced concrete bar structures during possible emergencies. A modified deformation model is used to calculate the bearing capacity of a bendable reinforced concrete element. Specific calculations can be performed at different levels: an element cross-section, an individual element, a structural system.*

**Key words:** *special effects, progressive collapse, super-critical stages of deformation, transformation of the design scheme*

**For citation:**

*Balushkin A.L. Assessment of the bearing capacity of elements of reinforced concrete floors with regard to adaptation to special effects. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 36-38 URL:*

*[http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** [10.52957/27821919\\_2020\\_1\\_36](https://doi.org/10.52957/27821919_2020_1_36)



The design-based analysis of buildings made of ferro-concrete at random emergency effects is widely used in construction due to a reasonable probability of man-caused threats: accidents of municipal life support systems, fires, explosions, as well as effects of nature (natural disasters) [1, 2]. The intensity of emergency loads associated with the operation of facilities has a tendency to increase. The importance of the calculations of various structural systems for the progressive collapse is confirmed by the development of the regulatory framework, in particular, the regulatory documents of the Russian Federation: SP 296.1325800.2017 [3], SP 385.1235800.2018 [4]. As for similar documents from other countries, UCF 4-023-03 should be mentioned [5].

Calculation of progressive collapse fully implements the nonlinear approach in the calculation of reinforced concrete structures. The specifics of calculations are manifested at different levels: a system, a system element (bar), an element cross-section. One of the most common emergency scenarios is when an inner column in a multi-storey multi-span frame fails (Fig. 1). When assessing the bearing capacity of a slab element located directly in the area of the destroyed support, the following effects occur.

**The structural system level.** A sudden method of external load application (impulse action), increase in span, presence of elastic support in the middle of the span.

**The element level.** Deformation with expansion force, presence of discrete cracks along the element. Transformation of the design scheme of the floor element (bendable element - rigid thread). Change of loading mode — from soft mode (torque load) to hard mode (curvature load).

**The element cross-section level.** Modal section loading, super-critical section work, deplanation of the cross section.

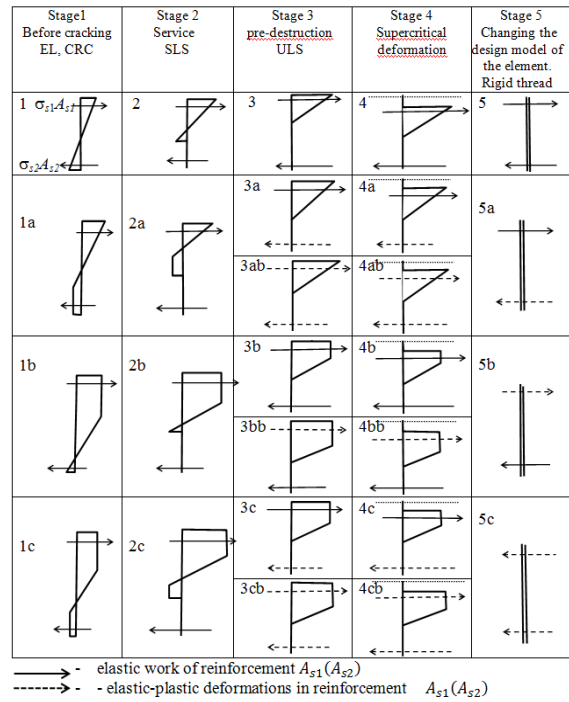
A modified deformation model is used to calculate the bearing capacity of a bendable reinforced concrete element. Adaptation of the deformation model is performed to obtain the crack formation process in the form of a system of discrete cracks, as well as to account for deplanation of concrete.

During the life cycle, the stress-strain state (SSS) of a bendable reinforced concrete element is usually transformed by continuous force deformation. Qualitative and quantitative changes of the parameters of an SSS element are determined in the specific stages (Table 1).

If the internal support suddenly fails, the dynamic effects of loading are manifested. Dynamic load factor  $k_{dim}$  is related to the plasticity factor  $k_{pl}$ , which allows to use a quasi-static calculation instead of a dynamic one. For the quantitative estimation of the coefficients  $k_{pl}$  and  $k_{dim}$  the calculation of the boundary curvature values is performed.

According to the calculation data, the maximum value  $k_{pl}=12,83$  is obtained at symmetrical reinforcement and taking into account the work of stretched reinforcement bar  $A_{s2}$  according to the strengthening scheme. For the case of unilateral reinforcement, the properties of which are described in the Prandtl diagram,  $k_{pl} = 4,26$ . The corresponding dynamic coefficient values are  $k_{dim} = 1,04$  and  $k_{dim} = 1,13$ . It is to be expected that, taking into account the clutch resilience, the values  $k_{pl}$  will increase slightly, which is optimal for improving the safety of the slab elements, as the effect of dynamic load application is minimized.

**Table 1. Possible stress-strain state stages during deformation of a bendable reinforced concrete bar element**



Values of bending moments in the cross-sections of a slab element at the operation stage ( $M_{ser}$ ) and after the failure of the internal column ( $M_{fr}$ ) are shown in Table 2.

**Table 2. Values of bending moments in cross-sections of a crossbar**

Powerfactor	Cross-sections		
	1-1	2-2	3-3
$m_{ser}$	-0,77	0,095	-0,152
$m_{fr}$	-0,173	0,146	0,280
$m_{fr}/m_{ser}$	2,250	1,540	1,850
$(m_{fr}/m_{ser})k_{dim}$	2,340	1,600	1,920

$$m_{ser} = \frac{M_{ser}}{WR_{bn}}, m_{fr} = \frac{M_{fr}}{WR_{bn}}, W = bh^2/6, k_{dim} = 1,04.$$

The modal loading of ferro-concrete elements was most fully considered in the works of N.I. Karpenko and his followers [2]. In the zone of the failed support (section 3-3, Fig. 1), the influence of changes in the original design scheme is shown: the designed span increases twice in the presence of elastic suspension in the form of a column of the second floor.

The work of section 3-3 is accompanied by initially forced unloading, then the process of deformation continues when the bending moment sign changes. This process should be interpreted as "hard mode" of loading – curvature loading.

Taking into account the effect of expansion is one of the additional reserves when assessing the bearing capacity for bendable elements of monolithic reinforced concrete structures at  $h/L \geq 30$  (Fig. 2).

In the process of calculation, the deformed scheme of the reinforced concrete element is considered with regard to the scheme of discrete cracks location (future stationary plastic joints).

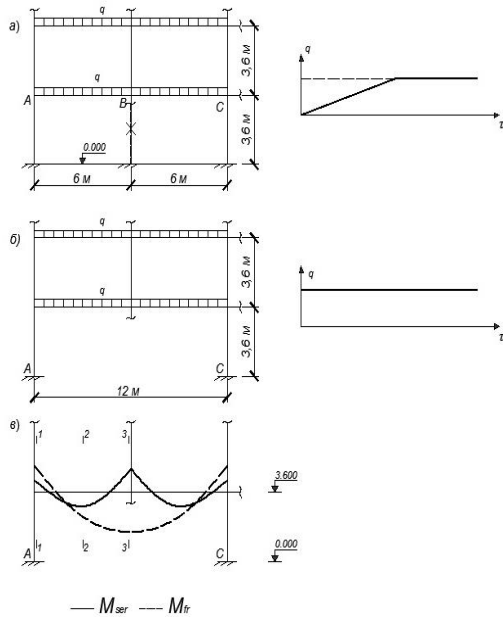


Fig. 1. Design scheme of a slab element in case of failure of the internal column of the ground floor

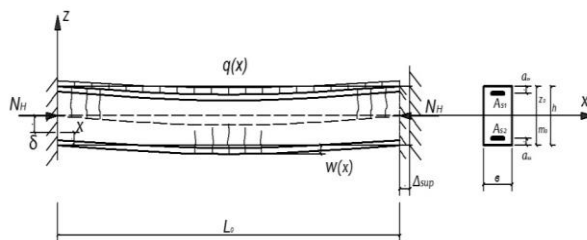


Fig. 2. Design scheme of a reinforced concrete element working with a split

After the relative deformations in one of the sections of the element in the extreme compressible concrete fibers have reached their ultimate compressibility:  $\varepsilon_{bc}(z)|_{z=0} = \varepsilon_{bcu}$ , the critical deformation stage is realized. This stage is realized only in the "hard mode" of loading. In the critical stage, the bendable bar element under the transverse load and longitudinal force is transformed into a rigid thread.

Discrete cracks – the curvature concentrators – determine the places of fracture of the axis of the bar and lead to the development of deplanation of the cross-sections of the concrete branch. Therefore, after the cracks are formed, the Bernoulli's hypothesis can be used to model the process of force resistance of a bendable reinforced concrete element to a limited extent. The V.Z. Vlasov's bimoment theory approach was used to account for depletions in the concrete branch. This theory was designed for continuous cross-section bars.

## REFERENCES

1. **Vlasov V.Z.** Selected works. M.: Izd. A.N. SSSR. 1963. V. II. 507 p. (in Russian).
2. **Karpenko N.I.** General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat. 1996. 416 p. (in Russian).
3. SP 296.1325800.2017 Buildings and structures. Accidental actions. M.: Standartinform. 2017. 24 p. (in Russian).
4. SP 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic provisions. M.: Standartinform. 2018. 20 p. (in Russian).
5. UCF 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse / Department of Defense USA. 2005.

Received 11.09.2020

Accepted 15.10.2020



UDC 691-404.8

# TRANSFORMATION OF A DISTURBED SITTING DROP

**A.A. Ignatyev, V.M. Gotovtsev**

Aleksey Aleksandrovich Ignatyev  
E-mail: ignatyevaa@ystu.ru

Hydraulic and Road Engineering Department, Yaroslavl State Technical University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia

Valeriy Mihailovich Gotovtsev  
E-mail: gotovtsev\_vm@mail.ru

Enterprise Management Department, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl State Technical University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia

*The paper presents the results of a study of equilibrium of a sitting drop from the standpoint of continuum mechanics. It is shown that the connection between internal forces and interfacial tensions is formed by gradients of internal pressures of a medium in inter-face layers that lead to forming body forces. It was found that the shape of a sitting drop with the contact angle equal  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  is the minimum surface energy state, in which the liquid - solid interface layer is not formed, and the surface energy of the drop takes the minimum value. It was also determined that the thickness of the interface layer varies depending on the values of the contact angle and reaches a maximum value at the complete wetting and complete non-wetting. Finally, the paper examines the impact of external and internal disturbances on the shape of a sitting drop.*

**Key words:** sitting drop, interphase layer, wetting angle

**For citation:**

Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M. Transformation of a disturbed sitting drop. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 39-44 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_39





## INTRODUCTION

The history of surface phenomena research spans over more than two hundred years – almost all the important scientists of their time were involved in it. The first practical result was obtained by Young in 1805 when he was studying the liquid wetting of a solid surface. He derived an equation to determine the equilibrium value of a contact angle, which was named after him [1]. Almost at the same time as Young, Laplace also derived a formula linking the capillary pressure defined by the curvature of the free liquid surface with the surface tension and main radii of the curvature [2]. When studying the effects of liquid lifting and lowering in thin capillaries (capillary effects), Jurin obtained a formula determining the height of lifting (lowering) of the liquid column in the capillary tube [3].

The results are based on the equilibrium equations of the elements of the medium volume examined in combination with the Laplace formula, which connects the capillary pressure of the liquid-gas interface layer with the curvature of the free liquid surface. However, the recent publications [4-5] indicate inconsistencies and direct contradictions in the practical study of surface effects. Therefore, a question arises about the actual possibility of using a macroscopic approach to describe surface phenomena. Instead, it is proposed to switch to the micro level of surface effects, i.e. the level of intermolecular interactions [6]. This approach is based on the representation of molecules by separate objects, between which the body forces of attraction and repulsion act. It is assumed that the gravitational force acts at a distance, decreasing sharply with its increase. The range of attraction forces is several diameters of interacting molecules [5], the range of repulsive forces is assumed to be zero [7].

In the monograph [8], an alternative to the simulation of surface phenomena was proposed by not taking into account the body forces of the intermolecular interactions by replacing them with an equivalent stress tensor. This representation of the stress state of the medium makes it possible to establish a connection between the body forces of molecular interaction and surface forces, based on the general concepts of mechanics of continuous media. The forces of intermolecular gravity (van der Waals forces [9]) form the internal pressure of the medium, the value of which is immeasurably greater than the external manifestations of surface effects.

This discrepancy is determined by the small range of molecular gravity forces comparable to the size of molecules. In the equilibrium state of the medium, the molecular forces of attraction and repulsion balance each other in the absence of external manifestations of intermolecular interaction. However, when media with different internal properties come into contact with each other, a region needs to be formed, in which one internal state of the environment transitions to another, i.e. the interface layer is formed. The thickness of the interface layer depends on the range of the forces of gravity, the value of which is small, while the difference in the internal state of the contact media can be very significant. This leads to the fact that powerful gradients of internal pressure of the medium at the thickness of the interface layer are formed in the interface layers.

The presence of an internal pressure gradient in accordance with the principles of continuum mechanics results in a body force, the value of which is determined by the expression:

$$F_V = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz}, \quad (1)$$

where  $F_V$  is the body force,  $P$  is the internal pressure of the medium,  $\rho$  is the density,  $z$  is linear coordinate flatwise to the surface of the interface layer. The body force is considered to be an external force in relation to the interface layer – this is the force that determines the external manifestations of surface effects. These include capillary pressure, surface tension, and other force factors to be measured experimentally. The value of the body force is determined by the ratio of the force acting on a small element of the medium caused by the pressure gradient to the mass of the element examined. The direction of the body force coincides with the direction of the pressure gradient vector, i.e. the body force is directed towards an increase in the internal pressure of the medium.

It follows from the above that the pressure gradient value in the interface layer can reach huge values, in the process of reduction the body force must be multiplied by the mass, the value of which is negligible if the thickness of the layer is taken into account. Accordingly, the integral effect of the body force on the macroscopic object will come in line with the external force factors acting on it. In the literature sources [5], the described mechanism is interpreted as the reason the liquid-gas interface layer can be formed. Internal pressures in the contacting vapor and liquid phases differ by several orders of magnitude, which leads to forming a powerful pressure gradient that creates the liquid-gas surface tension. However, the mechanism of its formation is rather complicated, it assumes that the compressibility of steam and phase transition is taken into account, and its examination is beyond the scope of this work.

## MATERIALS AND METHODS

Fig. 1 shows the force factors acting on the sitting drop. The following notation is used here:  $P_V$  is the capillary pressure of the liquid-gas interface layer;  $\gamma_{ls}$  is the liquid-solid surface tension;  $P_N$  is the solid surface reaction;  $F_V$  is the body force. These power factors are the external macroscopic load on the examined object. The right side of each figure shows the distribution of internal medium pressures over the thickness of the interface layers:  $P_1$  is the internal pressure in the liquid body phase;  $P_{ls}$  is the internal pressure of the medium in the interface layer;  $P_s$  is the internal pressure of the medium on a solid wall. These force factors are internal and therefore are not included in the equilibrium equations.

Internal pressure values can be found in the reference literature using the thermodynamic equation of the state of the medium [10] Note that the internal pressures are incomparably greater than the values of external force factors necessary to ensure the equilibrium of the drop. This is why the external force factors cannot change the internal pressures of the medium.

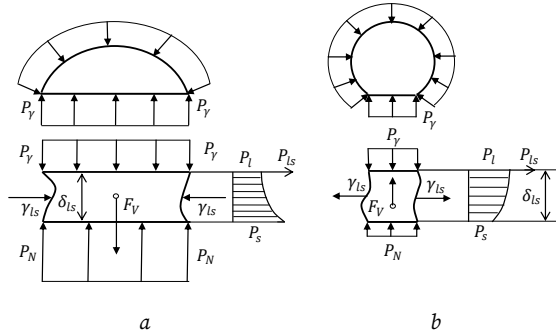


Fig. 1. Force factors in the liquid-solid interface layer:

$$a - \theta_0 < \frac{\pi}{2}; b - \theta_0 > \frac{\pi}{2}$$

Fig. 1, a shows that when  $\theta_0 < 90^\circ$  the body force  $F_V$  is directed to the solid surface and therefore creates additional pressure in the liquid-solid interface layer which tends to push the liquid out from the interface layer. However, the stresses created by the surface tension  $\gamma_{ls}$  lock the area of high pressure, preventing the liquid to be pushed out. When  $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$ , the reverse is observed, when a vacuum is created in the interface layer, and the stresses created by surface tension  $\gamma_{ls}$  prevent the inflow of liquid into the area of the interface layer. Thus the stress tensor in the liquid-solid interface layer is a pressure tensor. By definition, pressure determines the stress state in which the tensor contains three identical components.

## RESULTS

Let us calculate the parameters of the sitting drop depending on the contact angle, modeling its shape by the ball segment on the known geometric ratios. Table presents the results of the calculation for a drop of constant volume equal to the volume of the ball with a radius of  $1 \cdot 10^{-3}$  m, which is  $V = 4.19 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ . The table uses the following notation:  $\theta_0$  – contact angle;  $R$  – curvature radius of the free spherical surface of a drop;  $S_{fs}$  – free surface area;  $S_{ca}$  – contact area;  $S_{full}$  – the total interfacial area;  $P_V$  – capillary pressure;  $h$  – height of the ball segment.

The data given in the table shows that the minimum value of a full interface surface is reached when the contact angle  $\theta_0 = 180^\circ$ , and it corresponds to the complete non-wetting condition. At the same time, the capillary pressure in the drop reaches the maximum value and decreases with the decrease of the contact angle, taking the value  $P_V = 0$  when  $\theta_0 = 0^\circ$ . The tendency of the liquid body to take the shape of a ball with a minimum surface energy is a universally recognized fact, but in the case of interaction of the liquid with a solid surface, the situation changes dramatically. In the academic literature, the fact of decrease in surface energy of a liquid in the process of wetting is mentioned, but during the simulation of the process this point is not taken into account.

When  $\theta_0 = 90^\circ$ , the forces of adhesion and cohesion become equal, and it is no longer necessary to form an interface layer liquid-solid as a transition zone between contacting phases. Fig. 2, c shows the equilibrium of the liquid-gas interface layer under the capillary pressure  $P_V$  and surface tension forces  $\gamma_{ls}$ . It is not difficult to verify the equation:  $\gamma_{ls} \cdot 2\pi R = P_V \cdot \pi R^2$ , which leads to the equilibrium of the examined object with no additional impact from the tension  $\gamma_{ls}$ . Accordingly, the contact area of a liquid with a solid surface will not be a part of the full area of an inter-

face surface, which in this case is  $S_{full} = 9.97 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ . It is clear that this value is less than the surface area of the ball, which is  $12.56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ . Thus, when examining the interaction of a drop with a solid surface, the minimum surface energy of system is reached at  $\theta_0 = 90^\circ$ , i.e. the drop tends to change to this state under any wetting conditions. For the sake of brevity, this state will be called equilibrium.

Table. Results of the calculation for a drop of constant volume to the volume of the ball

$\theta_0$	$180^\circ$	$150^\circ$	$90^\circ$	$30^\circ$	$0^\circ$
$R \cdot 10^{-3}, \text{ m}$	1.000	1.004	1.26	4.26	$\infty$
$S_{fs} \cdot 10^6, \text{ m}^2$	12.56	11.82	9.97	15.27	0
$S_{ca} \cdot 10^6, \text{ m}^2$	0	0.79	4.99	14.25	
$S_{full} \cdot 10^6, \text{ m}^2$	12.56	12.61	14.96	29.52	
$h \cdot 10^{-3}, \text{ m}$	2.000	1.866	1.000	0.134	0
$P_V, \text{ Pa}$	140.0	139.4	111.1	32.86	0

The result obtained is quite unexpected, and it does not fall within the scope of existing notions. To substantiate this, we will use the following assumptions. Fig. 1, b shows the direction of the interface tension  $\gamma_{ls}$  from the gas phase to the liquid phase, which corresponds to the accepted notions. The liquid-solid interface layer is in a stretched state and acts as a spring, preventing the system from reducing the contact angle and moving to a state close to equilibrium. When  $\theta_0 < 90^\circ$ , the interface layer is compressed, i.e. works as a "spacer" that prevents the contact angle from increasing and approaching the equilibrium state. Thus, in both cases, the system tends to transition to the equilibrium state, and the liquid-solid interface layer prevents it. The introduction of the concept of the equilibrium state of the sitting drop allows us to bring in line and unify the theoretical base not only for the known manifestations of surface effects, but also to explain the new, sometimes unexpected phenomena.

## DISCUSSION

In recent years, due to the active development of outer space, the impact of gravity on many physical phenomena, including wetting, is being examined. As an example, there are some studies of various aspects of the spreading of drops on a solid substrate [11-13], in which it is noted that there is the process of wetting under conditions of changing gravity is not understood sufficiently. The work [14] shows the results of an experiment on studying the impact of gravity on the shape of a sitting drop. The experiment was conducted during parabolic flights of the European Space Agency, providing stable levels of gravity. It has been established that the change in gravity has a different effect on the shape of the drops depending on the contact angles.

Thus, when  $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$ , the increase in gravity causes the drop to flatten out and spread over the substrate at the same contact angle. When  $\theta_0 < \frac{\pi}{2}$ , the drop does not spread, and the diameter of the wetted area remains constant with increasing gravity. The liquid



at the edge of the drop "clings" to the substrate, and the contact angle changes to adjust to different levels of gravity. Fig. 2 shows the drop profiles when changing the gravity level and contact angle. Fig. 2,a shows the transformation of a drop with the increase in gravity when  $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$ . The disturbance, as it can be seen, has no effect on the contact angle, while the contact area increases. When the contact angle  $\theta_0 < \frac{\pi}{2}$ , its value increases with the increase of gravity, while the contact area stays the same, as shown in Fig. 2,b.

Note that the increase in gravity causes the drop to flatten regardless of the type of wetting. The center of gravity of the drop moves lower, and the force of gravity, as an external force, performs a positive work in this process. According to the principles of thermodynamics, the internal energy in this process should decrease, and the disturbance caused by the increase in gravity should be accompanied by changes that bring the system closer to the equilibrium state. It is necessary to keep in mind that the type of wetting does not change with the change in gravity, i.e. the medium state parameters do not change as well as the character of their distribution over the layer thickness.

When  $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$ , approaching the equilibrium state by the system is associated with a contact value decrease accompanied by an increase in the radius of the free surface of the drop  $R$  and a drop in capillary pressure. To analyze the transformation of a drop, the following equation of equilibrium of a liquid-solid interface layer will be used according to the diagram in Fig. 1,b:

$$P_N + F_V = P_Y. \tag{2}$$

The equation above takes into account the force factors distributed over the contact area of the liquid and solid phases. When gravity increases, the values in the equation change:  $P_N$  increases,  $F_V$  remains unchanged for the reasons discussed above,  $P_Y$  decreases, reflecting the tendency of the system to equilibrium.

Two variants of the drop transformation are possible – when the contact angle decreases and when the contact angle is con-

When  $\theta_0 < \frac{\pi}{2}$ , approaching the equilibrium state by the system is associated with the decrease of  $R$  and the increase of capillary pressure  $P_Y$ . The alternative associated with the increase of a contact angle is not examined for the reason noted above. The equation of equilibrium of the liquid-solid interface layer in accordance with Fig. 1,a is as follows:

$$P_N - F_V = P_Y. \tag{3}$$

The increase in gravity should result in the flattening of the drop, the lowering of its center of gravity, and the increase in the value of the reaction of the solid surface  $P_N$ . The equilibrium equation above shows that, at  $F_V = \text{const}$ , the process should be accompanied by an increase of capillary pressure  $P_Y$ , which is possible due to the decrease of radius of the free surface of the drop  $R$  and the corresponding decrease of the phase contact area. As shown in Fig. 2,b the contact area of the disturbed drop remains the same as before the disturbance begins. However, the increase in gravity should increase the contact area during the spreading process, and its preservation at an undisturbed level should be considered as a reaction of the system to external disturbances. In accordance with the Le Chatelier principle, the system reacts to external influences in a way that minimizes them. Keeping the contact area constant prevents the drop's center of gravity from lowering, i.e. opposes external disturbance.

However, it leads to a new contradiction, which is associated with the increase of the contact angle, and that should not happen according to the foregoing principles. However, it is necessary to pay attention to the fact that all the stated principles were based on the hypothesis about the spherical shape of the free surface of the drop, therefore, the change in capillary pressure was possible only when the value of  $R$  changed. Another way of influencing the capillary pressure is used in this case: it is related to the increase of free surface curvature in the area of three-phase contact line. Hence, the apparent change of the contact angle in this abnormal situation cannot be seen as the change in the wetting conditions.

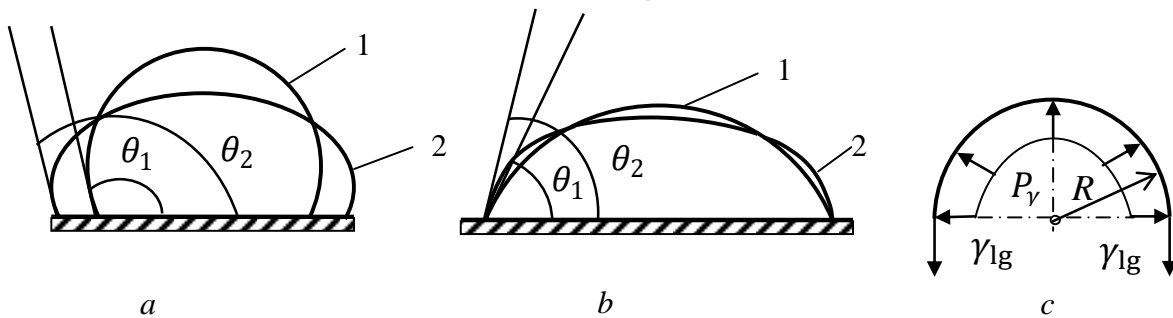


Fig. 2. Dependence of drop profile on gravity level and contact angle:  
1 – gravity level is  $g$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ); 2 – gravity level is higher than  $g$ ;

$$a - \theta_0 < \frac{\pi}{2}; b - \theta_0 > \frac{\pi}{2}; c - \theta_0 = \frac{\pi}{2}$$

stant:  $\theta_0 = \text{const}$ . Decrease of the contact angle is due to the change of wetting conditions, and that contradicts the accepted hypothesis  $F_V = \text{const}$ , and means that the external power factors have an impact on an internal state of medium. The second alternative  $\theta_0 = \text{const}$  satisfies the requirement of constancy of body force taking into account the increase of the contact area of phases due to increase of radius  $R$ . The considered scheme is in full accordance with Fig. 2,a.

The study examines the change in gravity as a force factor of disturbance, i.e. the impact on the external force factor – the force of gravity. Let us examine a "simpler" task associated with the transformation of a sitting drop when the wetting conditions change, i.e. the internal force factors defined by the contact angle value. Let us assume that in the course of the experiment a material with a higher adhesive capacity was used as a substrate. In this case, the system is disturbed by influencing the internal pa-



parameter of the system, which leads to the increase of liquid attraction by a solid surface.

When the contact angle is  $\theta_0 < \frac{\pi}{2}$ , such disturbance will lead to the increase of  $P_s$  in distribution of internal pressure of the medium along the thickness of an interface layer according to Fig. 1,a. The law of pressure change caused by intermolecular interaction in the liquid phase will not change, but the thickness of the interface layer along with  $P_s$  will increase. Thus, taking into account the fixed position of solid phase molecules and the limited radius of action of molecular forces, the impact of the solid phase will be reduced to a change in the boundary condition. If the nature of distribution of internal pressure stays the same, it becomes possible only at the increase in a thickness of an interface layer while preserving the dependence of  $P_{lg}(z)$  on initial thickness, where  $z$  is a linear coordinate flatwise to its surface.

The examined disturbance of the system is associated with the change of internal parameters of the system, i.e. the increase in its internal energy. That is why the system moves away from its equilibrium state under such influence. In the extreme case, when  $\theta_0 \rightarrow 0$  and  $R \rightarrow \infty$ , all the drops of liquid are dispersed in the liquid-solid interface layer. However, this issue is related to the stability of thin liquid films on a solid surface and is not examined in this work.

Let us examine the behavior of a sitting drop when  $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$  with the strengthening of hydrophobic properties of a solid surface. The distribution of the internal medium pressure shown in Fig. 1,b will also change, which is necessary to increase the value of the volume force  $F_v$ . However, in this case, the force is directed from the solid surface into the liquid phase, contributing to the separation of the liquid from the separating plane. When  $\theta_0 \rightarrow \pi$   $P_s \rightarrow 0$ , the liquid-solid interface layer is transformed into a liquid-gas layer, and the drop takes the shape of a ball. Thus, the condition of complete non-wetting of the solid surface by the liquid is met.

It should be noted that measuring the contact angle is one of the most common ways to assess the adhesive properties of a liquid-solid body system. This raises the question of the effect of the drop volume on the contact angle. In terms of the ideas presented, the answer is negative for the following reason. As shown, the parameters of the liquid-solid interface layer are determined by the intermolecular interaction of liquid and solid phases, i.e. internal parameters of the system state, and the internal pressure of the liquid phase is the deciding factor. The impact of a solid surface is reduced to the boundary condition, i.e. to the pressure between the interface layer and the solid surface. Given that the internal pressure of the medium is incomparably greater than the external force factors discussed above, they cannot influence the interaction of the phases that determine the contact angle.

## CONCLUSIONS

The following principles can be used to summarize the ideas discussed above.

The paper presents the force factors applied to a sitting drop in the equilibrium state. The factors applied were classified as external and internal. It is shown that the internal force factors such as the internal pressure of the medium is immeasurably greater than the external manifestations of surface effects. Accordingly, the interfacial tensions that define the shape of a sitting drop have no effect on the internal parameters of the state of the medium.

It is shown that the connection between internal forces and interfacial tensions is formed by gradients of internal pressures of a medium in interface layers that lead to forming body forces.

It was found that the shape of a sitting drop with the contact angle equal  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  is the minimum surface energy state, i.e. the equilibrium state. Under these conditions, the liquid-solid interface layer is not formed, and the surface energy of the drop is not included in the total internal energy of the sitting drop.

It is shown that under any wetting conditions, the system tends to take a form close to equilibrium, and the interface liquid-solid layer prevents it, providing the equilibrium of the object.

It was found that the thickness of the interface layer changes depending on the contact angle. It is zero in the equilibrium state and increases at any deviation of the angle from this value. When  $\theta_0 = 0$ , in case of complete wetting, all the liquid in the drop is spread in the solid-liquid interface layer. When  $\theta_0 = \pi$ , in case of complete non-wetting, the liquid-solid interface layer is transformed into a liquid-gas layer.

The work also reveals the mechanism of transformation of a drop with change in gravity, which was impossible within the scope of the previously established principles and views.

## REFERENCES

1. **Kikoin A.K., Kikoin I.K.** Molecular physics. M.: Nauka. 1976. 478 pp. (in Russian).
2. **Adamson A.** Physical Chemistry of Surfaces. Gast. A. New York: Wiley Interscience Publication. 1979. 784 p.
3. **Frenkel Y.** Kinetic theory of liquids. L.: Nauka. 1975. 301 pp. (in Russian).
4. **Roldugin V.I., Kharitonova T.V.** On the nonequilibrium thermodynamics of thermocrystallization motion of inclusions in solids. Colloid. J: Sci. Magaz. 2013. V. 75. N 2. P. 198-201 (in Russia).
5. **Rowlinson J.S., Widom B.** Molecular Theory of Capillarity. M.: Mir. 1986. 352 p.
6. **Rusanov A.I., Gudrich F.Ch.** Modern capillarity theory: to the 100th anniversary of Gibbs' capillarity theory. L.: Khimiya. 1980. 344 p. (in Russia).
7. **Loitsyanskiy L.G.** Fluid and gas mechanics. M.: Nauka. 1950. 678 pp. (in Russia).
8. **Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M.** Surface forces. M.: Nauka. 1985. 398 p. (in Russia).
9. **Kaplan I.G.** Introduction to the theory of intermolecular interactions. M.: Nauka. 1982. 312 p. (in Russia).
10. **Vargaftik N.B.** Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka. 1972. 708 p. (in Russia).



11. **Ababneh A., Amirfazli A., Elliott J.W.** *Effect of Gravity on Macroscopic Advancing Contact Angle of Sessile Drops.* *Canad. J. Chem. Eng.* 2006. V. 84. P. 39-43.
12. **Brutin D., Zhu Q., Rahli O.** *Sessile drop in microgravity: creation, contact angle and interface.* *Micrograviti Sci. Tecno.* 2009. V. 21. N 1. P. 67-76.
13. **Abel G., Ross G.G., Andrzejewski L.** *Wetting of a liquid surface by another immiscible liquid in microgravity.* *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. N 8. P. 1431-1438.
14. **Kabov O.A., Zaitsev D.V.** *The effect of wetting hysteresis on drop spreading under gravity.* *Dokl. Akad. Nauk.* 2013. V. 451. N 1. P. 37-40.

Received 11.09.2020

Accepted 12.10.2020



УДК 961.54:613.9

# ОСОБЕННОСТИ БИОДЕГРАДАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ

**С.В. Федосов<sup>1,2</sup>, В.Е. Румянцева<sup>3</sup>, С.А. Логинова<sup>3</sup>**

*Сергей Викторович Федосов<sup>1,2</sup>*  
E-mail: FedosovSV@mgsu.ru

*Кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337;  
Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000*

*Варвара Евгеньевна Румянцева<sup>3</sup>*  
E-mail: varryut@gmail.com

*Кафедра естественных наук и техносферной безопасности, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000*

*Светлана Андреевна Логинова<sup>3</sup>*  
E-mail: sl79066171227@yandex.ru



*Решение задач в области повышения стойкости бетонов к воздействию биологически агрессивных сред не теряют своей актуальности, поскольку видовое разнообразие биодеструкторов неуклонно растет. В целях разработки новых эффективных методов биозащиты бетона необходимо проведение комплексных исследований процессов коррозии в биологически агрессивных средах. В статье изложено современное представление о механизмах разрушения бетона в результате действия коррозионных процессов. Установлена зависимость степени биоповреждений от физико-механических свойств бетона, от степени агрессивности биодеструкторов, а также ряда сопутствующих этому взаимодействию факторов. В качестве объектов исследования использовались образцы цементного бетона, подверженные биообращению. Сформулированы основные положения, на основе которых целесообразно построение математической теории процессов биологической коррозии. Обосновано условие общности методологического подхода к моделированию процессов массопереноса при биокоррозии и жидкостной коррозии строительных материалов.*

**Ключевые слова:** бетон, биокоррозия, биодеструкторы, микроорганизмы, математическое моделирование, массоперенос

**Для цитирования:**

Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Особенности биодеградации гидротехнических бетонов. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 45-55 URL: [http://comincom.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincom.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_45



UDC 961.54:613.9

# BIODEGRADATION OF HYDROTECHNICAL CONCRETE

*S.V. Fedosov<sup>1,2</sup>, V.E. Rumyantseva<sup>3</sup>, S.A. Loginova<sup>3</sup>*

*Sergey Viktorovich Fedosov<sup>1,2</sup>*  
*E-mail: FedosovSV@mgsu.ru*

*Department of Binder and Concrete Technology, NRU Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia;*  
*Volga State Technological University, 3, pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russia*

*Varvara Evgenyevna Rumyantseva<sup>3</sup>*  
*E-mail: varrym@gmail.com*

*Department of Natural Sciences and Technosphere Safety, Ivanovo State Polytechnic University, 21, Sheremetevsky Prosp., Ivanovo, 153000, Russia*

*Svetlana Andreevna Loginova<sup>3</sup>*  
*E-mail: sl79066171227@yandex.ru*





*It is increasingly important to solve problems of increasing resistance of concrete to biologically aggressive media, since the species diversity of biodestructors is growing steadily. To develop new effective methods of concrete bioprotection, it is necessary to conduct complex research of corrosion processes in biologically aggressive media. The paper presents a modern view on mechanisms of concrete destruction as a result of corrosion. The study determined the dependence of biological damage on the physical and mechanical properties of concrete, on the aggressiveness of biodegraders, as well as a number of factors accompanying this interaction. Cement concrete samples subjected to biofouling were used as objects of study. The study includes the main provisions which can be used to formulate the mathematical theory of biological corrosion. Finally, the study substantiates the condition of generality of the methodological approach to the modeling of mass transfer processes at biocorrosion and liquid corrosion of building materials.*

**Key words:** concrete, biocorrosion, biodestructors, microorganisms, mathematic simulation, mass transfer

**For citation:**

Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. Biodegradation of hydrotechnical concrete. *Smart Composite in Construction*. 2020. V. 1. N 1. P. 45-55 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_45



Биоповреждение строительных материалов несет серьезную угрозу как для самих конструкций зданий и сооружений, так и для человеческой жизни [1]. Подтверждением является трагическое событие, произошедшее 10 июня 1999 г. в Санкт-Петербурге [2], – обрушение козырька вестибюля станции метро «Сенная площадь». Трагедия унесла жизни 7 чел. Независимой экспертной комиссией одной из причин обрушения было признано биологическое повреждение бетона [2]. Под влиянием внешних факторов на козырьке вестибюля появились коррозионные трещины, раскрытие которых ускорилось в результате воздействия на бетон кислот, солей и щелочей органического происхождения.

В то же время, согласно статистическим данным, экономический ущерб от биоповреждений различных сооружений по всему миру достигает десятков млрд. дол. в год [3]. Наиболее часто биоповреждения проявляются в виде высолов, отслоения, разрушения защитных слоев бетонных конструкций и т.д. [4]. Необходимость поиска все более эффективных методов борьбы с биоповреждениями очевидна.

Сложность исследования состояния эксплуатируемых строительных конструкций, подверженных биоповреждениям, состоит в том, что невозможно однозначно утверждать, что имеющиеся изменения являются результатом только непосредственного воздействия микроорганизмов. Коррозионные изменения чаще всего являются следствием воздействия не только микроорганизмов, но и воздействию совокупности сопутствующих факторов: температуры, света, механических нагрузок и т.п.

При биологической коррозии на границах бетонной конструкции возникают условия, отличающиеся от условий, вызывающих коррозию I, II и III видов. Кроме того, исходная система определяющих уравнений должна быть совместимой с уравнениями моделей сопутствующих процессов (непрерывное зарождение, рост, гибель микроорганизмов).

Основными биодеструкторами являются бактерии и грибы. Бактерии представляют собой одноклеточные колониальные микроорганизмы, которым свойственны разные виды обмена веществ. Грибы представлены одноклеточными или многоклеточными гетеротрофными микроорганизмами. Наиболее часто одноклеточные грибы развиваются в среде, обогащенной органическим углеродом [5]. Продуктами метаболизма многоклеточных грибов являются соединения химически агрессивные по отношению к строительным материалам, в особенности к бетону (например, широкий спектр органических кислот и т.д.) [5]. Нередко бактерии и грибы образуют биопленки на поверхности строительных материалов, которые локально генерируют высокие концентрации агрессивных метаболитов. В то же время биопленки обычно замедляют процессы взаимодействия цементного камня с основными агрессивными компонентами окружающей среды, причем их кольматирующая способность напрямую зависит от структурной пористости материала.

Подвижность и большое разнообразие ферментных систем позволяют микромицетам использовать в качестве источников питания материалы различного происхождения, в том числе и бетон. Исследования в области микробного воздействия на бетон [6, 7] показали, что к грибам, наиболее часто участвующим в биоразрушении бетона, относятся грибы родов: *Penicillium* (*P. ochrochloron*, *P.*

*purpurogenum*, *P. funiculosum*, *P. citrinum*) и *Aspergillus* (*A. niger*, *A. fumigatus*, *A. terreus*, *A. flavus*), *Trichoderma* (*T. viride*, *T. sp.*) (рис. 1).

Грибы рода *Penicillium* выделяют, главным образом, лимонную и глюконовую кислоты, *Aspergillus* – лимонную, глюконовую и щавелевую. Нередко один и тот же вид гриба способен синтезировать разнообразные родственные кислоты. Род *Aspergillus* [6] представлен одноклеточными, неразветвленными конидиеносцами, верхушки которых вздуты и несут на своей поверхности цепочки конидий, имеющих округлую форму и различную окраску (зеленую, желтую, коричневую). Род *Penicillium* [8] – конидиеносцы многоклеточные, ветвящиеся; на концах разветвлений конидиеносца располагаются стеригмы с цепочками конидий, которые бывают зеленой, голубой, серо-зеленой окраски или бесцветные. Верхняя часть конидиеносца имеет вид кисточки разной степени сложности.

Установлено, что микотоксины, продуцируемые грибами рода *Aspergillus* и *Penicillium*, обладают повышенной канцерогенной активностью [9]. Результатом роста грибов на поверхности бетона является снижение его физико-механических и эксплуатационных характеристик, а также ухудшение его внешнего вида. Крайним проявлением биоповреждающего действия в отношении бетонных элементов является их частичное или полное обрушение. Прямая биомеханическая деградация происходит путем проникновения грибных гифов в тело бетона. Грибные гифы могут воздействовать со значительной механической силой, которая возникает в результате тургорного давления в гифе [10].

Максимальное продуцирование кислот культурами грибов происходит при высоких температурах и низких значениях pH. Изменения в pH внутренней и внешней среды оказывают заметное влияние на рост микроорганизмов, изменяя активность и синтез белков, связанный с различными клеточными процессами. Установлено, что степень агрессивного биологического воздействия среды на бетон будет максимальной при значении pH = 7,2-7,6 [10].

Исследования цементного камня на биостойкость проводились над образцами -кубами с гранью 3 см, изготовленных из портландцемента марки ПЦ 500-Д0 с водоцементным отношением В/Ц = 0,3 [11]. Далее проводилось заражение образцов цементного камня микромицетами *Aspergillus* (рис. 2). Согласно СП 1.3.2322-08 все штаммы родов *Aspergillus* формально отнесены к патогенам IV группы. Средой для переноса штамма служили: мальт экстракт – 30 г/л, пептон – 1 г/л, агар – 20 г/л, вода (дистил.) – 1 л. На 28-е сутки проведения эксперимента был отчетливо виден хорошо развитый черновато-коричневого цвета мицелий гриба рода *Aspergillus niger*. Культивирование микроорганизмов проводилось на агаризованных питательных средах в чашках Петри. Некоторые ученые склонны выделять биокоррозию как самостоятельный, особый вид коррозии [12]. В водных средах адгезия микроорганизмов, выделение метаболитов и образование биопленок на поверхности бетона меняют химические условия на границе раздела «бетон – жидкость», вызывающие или ускоряющие общий коррозионный процесс в бетоне. Биопленка, возникающая после адсорбции органических и неорганических молекул на поверхности материала, изменяет существующую кинетику реакций [14]. В биопленках микробные



популяции проявляют функциональную взаимозависимость и коллективно способствуют биодеструкции бетона.

должны быть положены точные экспериментально подтвержденные представления о физической картине процессов при биологической коррозии цементных бетонов в

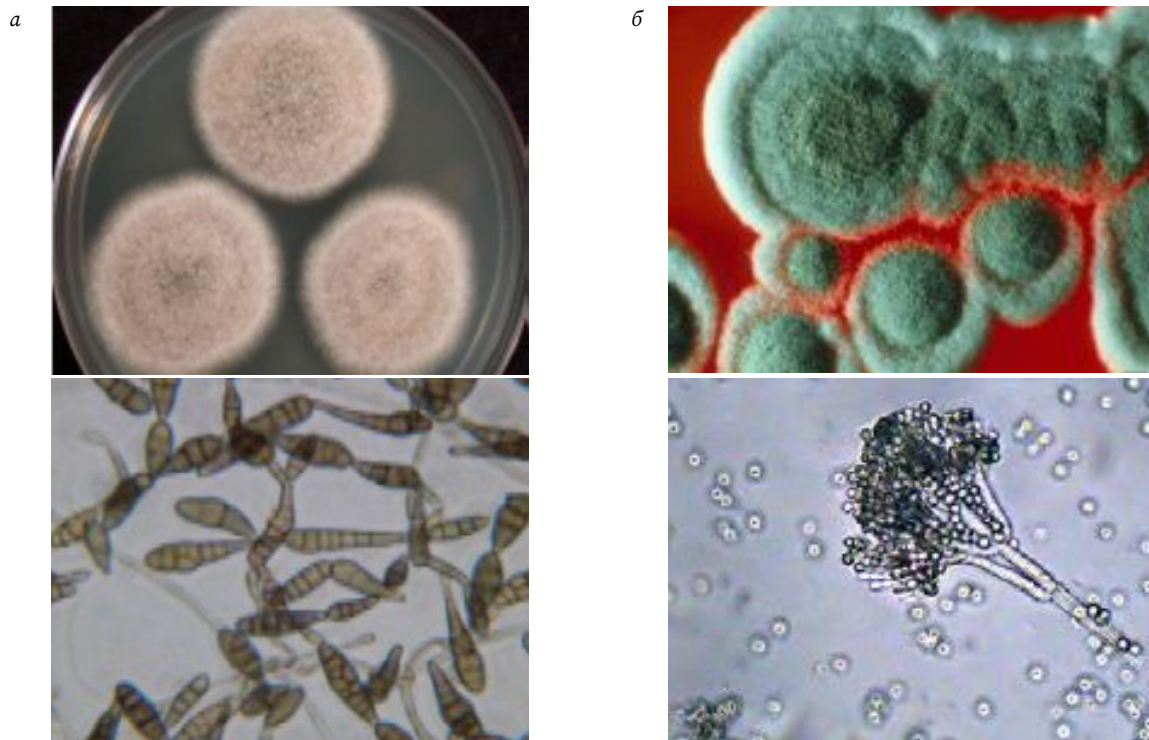


Рис. 1. Колонии грибов: а - под *Aspergillus*; б - под *Penicillium*  
Fig. 1. Colonies of fungi: a – genus *Aspergillus*; b – the genus *Penicillium*

Даже изначально грибостойкий бетон под воздействием совокупности абиотических и биотических факторов среды начинает разрушаться и использоваться в качестве источника энергии определёнными видами микроорганизмов, располагающими подходящим комплексом метаболитов.

Поскольку старение бетона является кумулятивным процессом, то повторяющиеся изменения внешних факторов (например, повышение или понижение температуры среды), часто отражается в скачкообразном протекании процесса разрушения. В это же время, когда температура среды обитания становится неблагоприятной для развития микроорганизмов (ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [10], скорость биологического разрушения бетона значительно падает. Стоит отметить тот факт, что ряд микроорганизмов может длительное время сохранять жизнеспособность в анабиотическом состоянии в условиях отрицательных температур [10]. При установлении оптимальной температуры ( $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) происходит быстрый переход микроорганизмов в активную фазу [10].

Установлено, что процесс проникновения биологической среды в структуру бетона изменяет его физико-химические показатели. В основу математического моделирования

агрессивных средах. Создание прогностической математической модели биоразрушения бетона затруднительно из-за взаимного влияния микроорганизмов, входящих в биоценозы.

Анализ литературных источников [14-20] показал, что на сегодняшний день накоплен большой объем научных данных о коррозионных процессах в бетоне в материаловедении строительных материалов: установлены и исследованы основные схемы химических реакций; дано математическое описание некоторых процессов коррозии; создана система нормативных документов по антикоррозионной защите. Однако биологическое разрушение бетона остается малоизученной проблемой как в России, так и за рубежом [14-20].

Биообрастание опор мостов и нефтедобывающих платформ, пирсов, а также других гидротехнических сооружений приводит к увеличению волновых нагрузок, к ускорению коррозионных процессов и т.д.

Образование биопленок на вертикальных поверхностях, как правило, происходит в областях малых давлений жидкости, т.е. в местах срыва потока. Критерием существования того или иного режима движения жидко

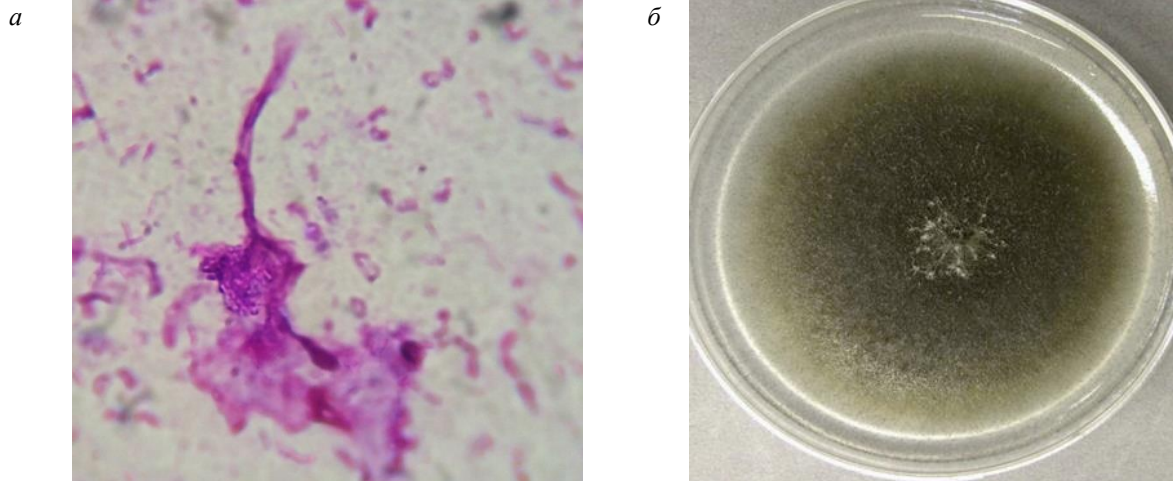


Рис. 2:

а – окраска по Граму; б – внешний вид колоний *Aspergillus niger* на седьмые сутки культивирования

Fig. 2:

a – Gram stain; b – the appearance of *Aspergillus niger* colonies on the 7th day of cultivation

сти является число Рейнольдса ( $Re$ ), представляющее собой отношение сил инерции к силам трения, возникающим в движущейся жидкости:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} = \frac{d \cdot v}{\nu}, \quad (1)$$

где  $v$  – средняя скорость движения жидкости, м/с;  $d$  – величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью, м;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

При средней скорости течения рек  $\approx 1,8-2$  км/час расчетное значение числа Рейнольдса составляет  $1,9-2 \cdot 10^5$  [21]. Для горных рек, скорость течения которых может достигать 6-10 м/с, расчетные значения числа Рейнольдса обычно находятся в диапазоне  $4,3-5,8 \cdot 10^5$  [21].

Вблизи обтекаемой поверхности скорость течения намного меньше, чем в основной части потока, а в месте контакта поверхности и жидкости равна нулю. Согласно теории пограничного слоя на обтекаемых поверхностях существует две зоны: зона натекания и зона установившегося размера турбулентного пограничного слоя [21]. В случае обтекания шероховатой поверхности, подверженной биообрастанию, турбулентность в пограничном слое возникает значительно раньше, чем при обтекании гладких поверхностей. Толщина пограничного слоя не может обладать четко выраженной границей в связи с природной неравномерностью биообрастания поверхности [21].

$$\rho \frac{dW}{dt} = R - \text{grad}p + \mu \Delta W + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}W), \quad (2)$$

Схема обтекания одиночной опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса представлена на рис. 3.

Решения уравнений Навье-Стокса обладают большим значением в гидродинамике. При течении жидкости с малыми числами Рейнольдса нелинейность уравнений не проявляется.

В векторной форме уравнения Навье-Стокса сводятся к уравнению вида [22]:

$$\frac{\partial C(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \vec{w} \cdot \text{grad}[C(\vec{r}, \tau)] = \quad (3)$$

$$= \text{div}\{D(\vec{r}, \tau) \cdot \text{grad}[C(\vec{r}, \tau)]\}; \quad (4)$$

$$\vec{r} = \{x, y, z\}; \quad (4)$$

$$\vec{w} = 0; \quad (5)$$

где  $R$  – вектор напряжения объемной силы.

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии имеет вид [23]:

Тогда при низкой скорости движения жидкости:

$$\frac{\partial C(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = D \cdot \text{div}\{\text{grad}[C(x, y, z, \tau)]\}. \quad (6)$$

При биообрастании рост и генерация биомассы представлены непрерывными во времени процессами, поэтому биопленка имеет разную толщину по всей площади поверхности конструкции. Скорость накопления биомассы в первую очередь определяется скоростью тока воды, от которой зависит возможность оседания и удержания организмов на субстрате, снабжения их питательными веществами и кислородом и др. Непрерывные процессы роста, размножения и гибели популяций микроорганизмов затрудняет решение поставленных задач.

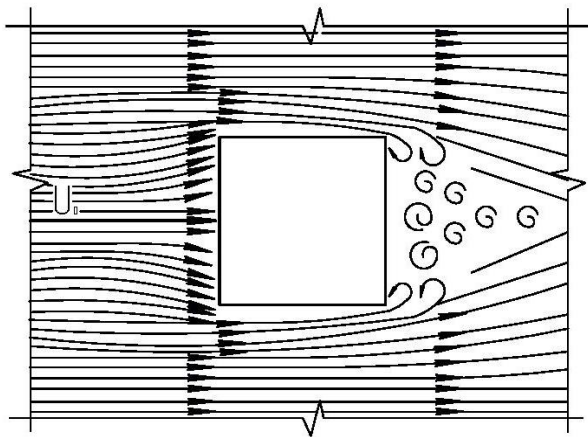


Рис. 3. Схема обтекания опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса

Fig. 3. Scheme of the flow around the bridge support fluid flow at low Reynolds numbers

В [23] авторами предложена физико-математическая модель диффузионных процессов в системе «цементный бетон – биоупленка – жидкость», учитывающая кинетику процессов роста, размножения и гибели микроорганизмов.

Физико-математическая модель массопереноса в неограниченной двухслойной пластине может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений параболического типа в частных производных с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе между бетоном и биоупленкой [23]:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (8)$$

где  $C_1(x, \tau)$  – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , (кг СаО/кг бетона);  $C_2(x, \tau)$  – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в биоупленке в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , (кг СаО/кг биомассы);  $k_{1,2}$  – коэффициенты массопроводности,  $m^2/c$ ;  $\delta_1$  – толщина бетонной конструкции, м;  $\delta_2$  – толщина биоупленки, м.

Начальные условия:

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}, \quad (9)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}, \quad (10)$$

где  $C_{1,0}$  – начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг бетона;

$C_{2,0}$  – начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг биомассы.

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-\delta_1} = 0. \quad (11)$$

В месте контакта бетона и биоупленки. Равновесие в системе подчиняется закону Генри:

$$C_1(x, \tau)|_{x=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{x=0}, \quad (12)$$

где  $m$  – константа равновесия Генри, кг биоупленки/кг бетона.

$$-\rho_{бет} \cdot k_1 \cdot \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_{биом} \cdot k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (13)$$

где  $\rho_{бет}$ ,  $\rho_{биом}$  – плотности бетона и биомассы, кг/м<sup>3</sup>.

$$-k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_n(\tau). \quad (14)$$

где  $q_n(\tau)$  – плотность потока массы, уходящей от биоупленки в поток жидкости.

Общее решение системы (7) – (14) имеет вид:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_1 K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK_1^* \left[ Fo_m + \frac{(1-\bar{x})^2}{2} + \varphi(K_1, N, K_\delta) \right] \right\} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \nu_n^2} (\mu_n \sin \mu_n \cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_1} K_\delta) - \sqrt{K_1} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_1} K_\delta)) - \frac{N}{\sqrt{K_1}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m). \quad (15)$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_1 K_\delta} (1 - NK_\delta + K_1^* \bar{x} - Fo_m K_1 K_\delta) + NK_1^* (\varphi(K_1, N, K_\delta) - \frac{1 + K_1 \bar{x}^2}{2} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_n^2 \nu_n^2} (\mu_n \sin \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_1} (K_\delta - \bar{x})) - \frac{\mu_n}{\sqrt{K_1}} \sin(\mu_n \sqrt{K_1} K_\delta) \cos(\mu_n \sqrt{K_1} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_1}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_1} \bar{x})) + K_1^* \left[ N \cos \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_1} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_1}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_1} \bar{x}) \right] \exp(-\mu_n^2 K_1 Fo_m). \quad (16)$$

$$\varphi(K_1, N, K_\delta) = \frac{1 + K_1 K_\delta (3K_\delta + 3N + NK_1 K_\delta^2)}{6(1 + NK_1 K_\delta)}, \quad J = \int_0^1 Z_{1,0}(\xi) \cos(\mu_n (1 - \xi)) d\xi, \quad (17)$$

$$tg \mu_n = N \sqrt{K_1} tg(\mu_n \sqrt{K_1} K_\delta).$$

Здесь  $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$  – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;  $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$  – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине биоупленки;

$\bar{x} = x/\delta_1$  – безразмерная координата; коэффициент  $K_k = k_2/k_1$ ; коэффициент  $K_\delta = \delta_2/\delta_1$ ;  $q_n$  – плотность потока массы, уходящей от биоупленки в поток жидкости;  $N = (\rho_{биом} \cdot k_2)/(\rho_{бет} \cdot k_1 \cdot m)$  – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $Fo_m = (k_1 \cdot \tau)/\delta_1^2$  – критерий Фурье;  $K_1^* = q_n \cdot R/k_2 \cdot C$  – массообменный критерий Кирпичева.

Сложный механизм роста, размножения и гибели микроорганизмов удастся учесть введением коэффициента  $N$ , учитывающего изменения плотности биомассы.

Согласно В.Т. Ерофееву [4, 12, 19], уравнение, учитывающее рост, размножение и гибель микроорганизмов с учетом естественной смертности, стохастический характер этих процессов, может быть представлено в виде:

$$X = \bar{X}(\mu_X - A_X). \quad (18)$$

где  $\bar{X}$  – предельная критическая биомасса;  $\mu_X$  – удельная скорость роста биомассы;  $A_X$  – удельная скорость отмирания клеток.

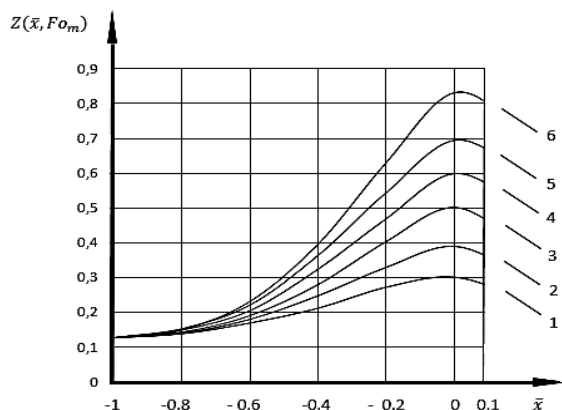


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при  $K_k = 1$ ;  $K_\delta = 0,1$ ;  $N = 1$ ;  $Fo_m = 1$ ,  $Ki_H^*$ : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3.

Fig. 4. Profiles of dimensionless concentrations over the thickness of concrete and biofilm at  $K_k = 1$ ;  $K_\delta = 0,1$ ;  $N = 1$ ;  $Fo_m = 1$ ,  $Ki_H^*$ : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3.

Полученные выражения (15) - (17) позволяют определять значения концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции и биопленки в любой момент, а также дают возможность расчета кинетики процесса в жидкой фазе, что, в конечном итоге, позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговечность бетонных конструкций, эксплуатируемых в биологически агрессивных средах. Некоторые результаты расчетов по полученным выражениям (15) - (17) приведены на рис. 4, 5.

Полученные представления о гидродинамических процессах, имеющих место при биообращении бетонных конструкций на границе раздела фаз, позволяют исследовать процессы массопереноса в неподвижном потоке воды, а также в перспективе рассчитать коэффициенты массопереноса для различных скоростей потока.

Понимание причин и механизмов биоповреждения строительных конструкций позволит дать разумные рекомендации по ликвидации последствий биопоражения и по предупреждению этого негативного явления в будущем. Мониторинг технического состояния конструкций, прогнозирование их долговечности и надежности возможны только на основе соответствующих методов расчета, позволяющих выполнять соответствующие количественные оценки с надлежащей точностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Videla H.A. Manual of Biocorrosion. CRC Press: Boca Raton, FL. 1996. P. 272.
2. Крыленков В.А., Антонов В.Б., Иванов С.Ю., Крогуис М.Э., Малышев В.В., Старцев С.А., Челибанов В.П. Основные итоги биологической экспертизы при расследовании причин обрушения козырька наземного вестибюля станции Петербургского метрополитена «Сенная площадь». Сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф.: Эколо-

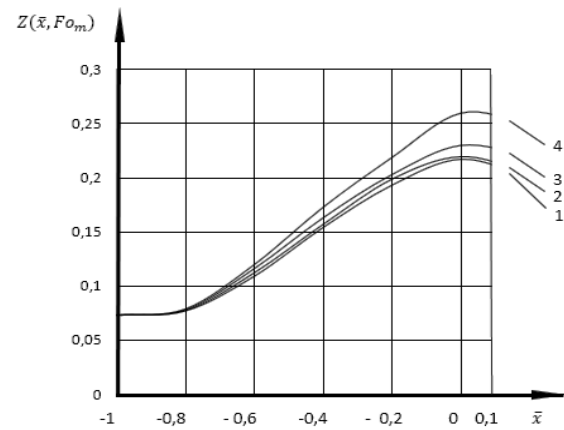


Рис. 5. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при  $K_k = 1$ ;  $K_\delta = 0,1$ ;  $Fo_m = 1$ ,  $Ki_H^* = 0,5$ ;  $N$ : 1 - 0,01; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,5.

Fig. 5. Profiles of dimensionless concentrations over the thickness of concrete and biofilm at  $K_k = 1$ ;  $K_\delta = 0,1$ ;  $Fo_m = 1$ ,  $Ki_H^* = 0,5$ ;  $N$ : 1 - 0,01; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,5.

гические проблемы биодegradации промышленных, строительных материалов и отходов производств. Пенза: 2000. С.57.

3. Огарков В.Н., Огаркова Г.Р., Самусенко Л.В. Проблема микробной биодеструкции строительных материалов, зданий и сооружений. Изв. Иркутского гос. ун-та. 2013. № 3. С. 113-115.
4. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Смирнов В.Ф., Захарова Е.А. Исследование биостойкости строительных материалов с учетом их старения. Вестник Волгоградского гос. арх.-строит. ун-та. 2011. № 22 (41). С. 73-78.
5. Сухаревич В.И., Кузикова И.Л., Медведева Н.Г. Защита от биоповреждений, вызываемых грибами. Санкт-Петербург: ЭЛБИ-СПБ. 2009. 207 с.
6. Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Смирнова О.Н., Захарова Е.А. Агрессивные метаболиты грибов и их роль в процессе degradation материалов различного химического состава. Сб. матер. конф.: Пробл. экологического материаловедения. Пенза, 1995. С. 82-86.
7. Кноп М. Все о грибах. М.: БММ АО. 2000. 256 с.
8. Михайлова Р.В., Сапунова Л.И., Колесникова С.С. Зависимость ферментативной активности грибов рода *Penicillium* от источника питания. Контроль и управление биотехнол. процессами. Горький, 1985. С. 68.
9. Антонов В.Б. Антропогенно-очаговые болезни жителей большого города. Журн. инфектологии. 2009. Т. 1. № 2/3. С. 7-12.
10. Кондратюк Т.А., Коваль Э.З., Рой А.А. Поражение микромицетами различных конструкционных материалов. Микробиол. журн. 1986. Т. 48. № 5. С. 57-60.
11. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Kopovalova V.S., Logionova S.A. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of «free calcium hydroxide» during corrosion of cement concretes. Int. J. Comp. Civ. Struct. Eng. 2018. V. 14. N 3. P. 161-168.



12. **Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А.** Основы математического моделирования биокоррозии полимербетонных. *Фунд. исследования*. 2014. № 12-4. С. 701-707.
13. **Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A.** Modeling of porous material fracture. *Mag. Civ. Eng.* 2017. 69(1). P. 3-22. DOI:10.18720/MCE.69.1.
14. **Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G.** Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. *Power Technol. and Eng.* 2017. 4(51). P. 377-384. DOI:10.1007/s10749-017-0842-8.
15. **Newale R., Sartape Y., Ramane A., Telrandhe S., Vairal S., Girish J.** Structural Audit, Repair and Rehabilitation of Building. *Int. J. Innov. Res. Sci.* 2017. 6(3). P. 4679-4693. DOI:10.15680/IJIRSET.2017.0603255.
16. **Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P. V., Sorokin E.V., Yudina O.A.** Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete. *Mag. Civ. Eng.* 2014. 1(45). P. 41-52. DOI:10.5862/MCE.45.5.
17. **Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G.** Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiol. Res.* 2010. 165 (1). P. 21-32.
18. **Han F., Zhang Z.** Hydration, mechanical properties and durability of high-strength concrete under different curing conditions. *J. Therm. Anal. and Calor.* 2018. 132. P. 823-834. DOI:10.1007/s10973-018-7007-3.
19. **Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Irina E.** Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. *Procedia Eng.* 2016. 165. P. 1448-1454. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.878
20. **Шлихтин Г.Т.** *Геология пограничного слоя*. М.: Наука. 1974. 714 с.
21. **Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.** *Проблемы гидродинамики и их математические модели*. М.: Наука. 1977. 408 с.
22. **Рудобахта С.П., Карташов Э.М.** *Диффузия в химико-технологических процессах*. М.: КолосС. 2010. 478 с.
23. **Fedosov S.V., Loginova S.A.** Mathematical model of concrete biological corrosion. *Mag. Civ. Eng.* 2020. N 7. P. 130-138
- buildings and structures. *Irkutsk State Univer. Bul.* 2013. N 3. S. 113-115 (in Russian).
4. **Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F., Zakharova E.A.** Investigation of the biostability of building materials taking into account their aging. *Bul. of the Volgograd State Univer. of Arch. and Civ. Eng.* 2011. N 22 (41). S. 73-78 (in Russian).
5. **Sukharevich V.I., Kuzikova I.L., Medvedeva N.G.** Protection against bio-damage caused by fungi. *St. Petersburg: ELBI-SPB.* 2009. 207 p. (in Russian).
6. **Smirnov V.F., Semicheva A.S., Smirnova O.N., Zakharova E.A.** Aggressive metabolites of fungi and their role in the degradation of materials of different chemical composition. *Sat. mater. Conf. : Probl. of Env. Mat. Sci. Penza, 1995.* S. 82-86 (in Russian).
7. **Knop M.** *All about mushrooms*. Moscow: BMM AO. 2000. 256 p. (in Russian).
8. **Mikhailova R.V., Sapunova L.I., Kolesnikova S.S.** Dependence of the enzymatic activity of fungi of the genus *Penicillium* on the food source. *Control and manag. of biotechnol. proc. Gorky.* 1985. P. 68. (in Russian).
9. **Antonov V.B.** Anthropogenic focal diseases of residents of a large city. *J. of Infectology.* 2009. V. 1. N. 2/3. S. 7-12 (in Russian).
10. **Kondratyuk T.A., Koval E.Z., Roy A.A.** The defeat of various structural materials by micromycetes. *Microbiol. J.* 1986, V. 48. N 5. S. 57-60 (in Russian).
11. **Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A.** Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of "free calcium hydroxide" during corrosion of cement concretes. *Int. J. for Comput. Civ. and Struct. Eng.* 2018. V. 14. N 3. P. 161-168.
12. **Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A.** Fundamentals of mathematical modeling of polymer concrete biocorrosion. *Basic res.* 2014. N 12-4. P. 701-707 (in Russian).
13. **Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A.** Modeling of porous material fracture. *Mag. of Civ. Eng.* 2017. 69 (1). P. 3-22. DOI:10.18720/MCE.69.1.
14. **Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G.** Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. *Power Techn. and Eng.* 2017. 4(51). P. 377-384. DOI:10.1007/s10749-017-0842-8.
15. **Newale R., Sartape Y., Ramane A., Telrandhe S., Vairal S., Girish J.** Structural Audit, Repair and Rehabilitation of Building. *Int. J. Innov. Res. Sci.* 2017. 6(3). P. 4679-4693. DOI:10.15680/IJIRSET.2017.0603255.
16. **Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P. V., Sorokin E.V., Yudina O.A.** Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete. *Mag. Civ. Eng.* 2014. 1(45). P. 41-52. DOI:10.5862/MCE.45.5.
17. **Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G.** Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiol. Res.* 2010. 165 (1). P. 21-32.
18. **Han F., Zhang Z.** Hydration, mechanical properties and durability of high-strength concrete under different curing conditions. *J. Therm. Anal. And Calor.* 2018. 132. P. 823-834. DOI:10.1007/s10973-018-7007-3.

Поступила в редакцию 25.09.2020

Принята к опубликованию 26.10.2020

## REFERENCES

1. **Videla H.A.** *Manual of Biocorrosion*. CRC Press: Boca Raton, FL. 1996, P. 272.
2. **Krylenkov V.A., Antonov V.B., Ivanov S.Yu., Krogus M.E., Malyshev V.V., Startsev S.A., Chelibanov V.P.** The main results of the biological examination in the investigation of the causes of the collapse of the canopy of the ground entrance hall of the St. Petersburg metro station "Sennaya Ploschad". *Sat. mater. III All-Russian. Sci. - pract. Conf. : Env. probl. of biodegrad. of industr., building mat. and industr. waste. Penza: 2000.* P. 57 (in Russian).
3. **Ogarkov B.N., Ogarkova G.R., Samusenok L.V.** The problem of microbial biodegradation of building materials,



19. **Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Irina E.** *Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. Procedia Eng.* 2016. 165. P. 1448-1454. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.878
20. **Schlichting G.** *Theory of the boundary layer.* M.: Nauka. 1974. 714 p. (in Russian).
21. **Lavrent'ev M.A., Shabat B.V.** *Problems of hydrodynamics and their mathematical models.* M.: Nauka. 1977. 408 p. (in Russian).
22. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** *Diffusion in chemical engineering processes.* M.: KolosS. 2010. 478 p. (in Russian).
23. **Fedosov S.V., Loginova S.A.** *Mathematical model of concrete biological corrosion. Mag. Civ. Eng.* 2020. N 7. P. 130-138.

Received 15.09.2020

Accepted 16.10.2020





УДК 621.929.6

# *СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ В БАРАБАННОМ УСТРОЙСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ*

*М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, С.Н. Черпицкий, А.Б. Капранова*

*Михаил Юльевич Таршис*

*E-mail: : tarshismy@ystu.ru*

*Сергей Николаевич Черпицкий*

*E-mail: cherpitskiisn@ystu.ru*

*Анна Борисовна Капранова*

*E-mail: kapranovaab@ystu.ru*

*Леонид Владимирович Королев*

*E-mail: korolevly@ystu.ru*

*Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов,  
Ярославский государственный технический университет,  
Московский просп., 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023*

*Кафедра прикладной математики и вычислительной техники,  
Ярославский государственный технический университет,  
Московский просп., 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023*



*Разработана система контроля качества сыпучей смеси, получаемой в устройстве непрерывного действия. Контролируемым параметром является критерий однородности смеси, по которому и оценивается её качество. В основе метода контроля лежит способ определения свойств сыпучей смеси по распределению частиц перерабатываемых компонентов в поперечном сечении, фиксируемому при прохождении через прозрачную перегородку на выходе из устройства. Эффективность методики обеспечивается использованием бесконтактного метода оценки однородности сыпучего состава, применение которого исключает искажение пространственного распределения частиц в сочетании с интегральным критерием оценки однородности смеси, отличающимся высокой информативностью.*

**Ключевые слова:** контроль качества, сыпучая смесь, однородность, метод оценки, интегральный критерий, информативность

**Для цитирования:**

Таршис М.Ю., Королев Л.В., Черницкий С.Н., Капранова А.Б.. Система контроля качества сыпучей смеси в барабанном устройстве непрерывного действия. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 56-64 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_56



UDC 621.929.6

# QUALITY CONTROL SYSTEM FOR BULK MIX IN A CONTINUOUS DRUM DEVICE

*M.Y. Tarshis, L.V. Korolev, S.N. Cherpitsky, A B. Kapranova*

*Mikhail Y. Tarshis*

*E-mail: : tarshismy@ystu.ru*

*Sergey N. Cherpitsky*

*E-mail: cherpitskiisn@ystu.ru*

*Anna B. Kapranova*

*E-mail: kapranovaab@ystu.ru*

*Department of Theoretical Mechanics and Materials Resistance, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, Russia, 150023*

*Leonid V. Korolev*

*E-mail: korolevly@ystu.ru*

*Department of Applied Mathematics and Computer Engineering, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, Russia, 150023*



*Within the course of study, we have developed the system of quality control of bulk mix blended in a continuously operating device. The controlled parameter is the homogeneity criterion of the mixture which is used to assess its quality. The control method is based on the method of determining the properties of the bulk mixture by the distribution of particles of the processed components in the cross section, which is fixed when passing through a transparent partition at the device outlet. The effectiveness of the methodology is ensured by using a non-contact method of assessing the homogeneity of bulk contents. This method eliminates the distortion of the spatial distribution of particles in combination with the integral criterion for assessing the homogeneity of the mixture, which is highly informative.*

**Key words:** *quality control, bulk mixture, uniformity, evaluation method, integral criterion, informativeness*

**For citation:**

*Tarshis M.Y., Korolev L.V., Cherpitsky S.N., Kapranova A.B. Quality control system for bulk mix in a continuous drum device. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 56-64 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** *10.52957/27821919\_2020\_1\_56*



## ВВЕДЕНИЕ

Задача проектирования устройства для приготовления сыпучих материалов, как и любого технического устройства, решается на основе анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований реализуемого им процесса. Как правило, в результате таких исследований могут быть получены зависимости, связывающие критерий качества продукта (смеси) с параметрами смесительной системы (смеситель, дозаторы, материалы) [1, 2]. Однако при практической реализации процесса могут меняться внешние условия его протекания как в силу возникновения случайных факторов, так и при использовании устройства для переработки материалов, параметры которых находятся за пределами проведенных исследований. При этом параметры качества получаемых составов могут выходить за допустимые пределы. В этом случае необходимо обеспечение непрерывного контроля качества смеси и, при необходимости, проведение корректировки параметров смесительной системы.

В данной работе рассматривается система контроля качества сыпучей смеси в барабанных устройствах непрерывного действия. Барабанные смесители непрерывного действия широко применяются в ряде отраслей строительного производства, химической промышленности, металлургии, сельского хозяйства и во многих других. За последние годы предложен ряд конструкций устройств такого типа [3, 4], отличающихся эффективностью при работе в неблагоприятных условиях (в том числе, устройства для приготовления смесей, склонных к сегрегации частиц, их агломерации, устройства для переработки составов, содержащих добавки в малой концентрации и т.д.). Именно такие устройства непрерывного действия должны быть оснащены системой непрерывного контроля и корректировки качества получаемого состава. С другой стороны, система контроля особенно необходима для получения материалов, необходимые свойства которых обеспечиваются точностью концентраций компонентов, входящих в смесь.

### ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ В УСТРОЙСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Конечной целью осуществления контроля качества сыпучей смеси, получаемой в смесительной системе, является поддержание параметров качества смеси в требуемых пределах, путем конструктивных и режимных воздействий на саму систему. На рис. 1 показан вариант реализации системы контроля качества сыпучей смеси барабанно-лопастных устройствах непрерывного действия [5, 6]. Система и агрегат включают смеситель 1 с приводом 2, патрубки загрузки компонентов 3, 4 и соответствующие дозирующие устройства 5, 6, бункер 7 – выгрузки смеси. Торцевая стенка 8 (борт, подпорное кольцо) или её фрагмент выполнен из прозрачного материала. Видеокамеры 9 установлены напротив стенки 8 и над транспортером 10 смеси. Информация с камер 9 поступает на компьютер 11 и выводится на экран монитора 12.

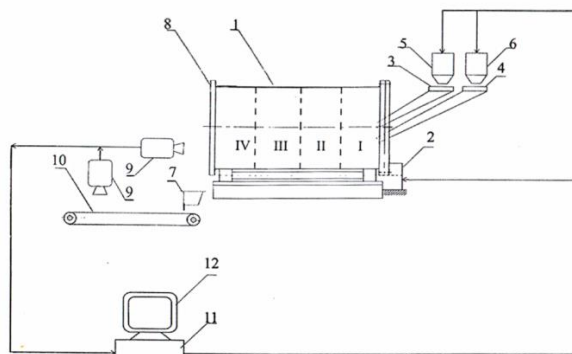


Рис. 1. Система контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанном агрегате  
Fig. 1. System for monitoring and adjusting the quality of the bulk mixture in the drum unit

Необходимо отметить, что для контроля качества сыпучей смеси важную роль имеет выбор метода получения информации о распределении компонентов в объеме смеси. Такой выбор должен быть основан на анализе известных экспериментальных методик, которые можно разделить на контактные [1, 2, 7] и бесконтактные [4, 8-16]. В данном случае принят бесконтактный метод оценки, основанный на анализе фотоизображения плоского сечения смеси через прозрачную стенку [13, 14, 16]. Этот метод эффективен из-за его низкой трудоемкости, скорости и точности (в силу отсутствия при его использовании искажений структуры смеси). В качестве критерия оценки качества (однородности) смеси используются традиционный коэффициент неоднородности, широко применяемый в нашей стране [1, 2]:

$$V_c = \frac{100}{c_0} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - c_0)^2}, \% \quad (1)$$

где  $c_i$  – массовая (или объемная) концентрация ключевого компонента в  $i$ -пробе;

$n$  – количество проб;

$c_0$  – средняя концентрация ключевого компонента по объему смеси.

В качестве другого информативного критерия параллельно используется интегральный аналог коэффициента неоднородности [15, 17], позволяющий дать оценку качества в широком диапазоне масштабов проб:

$$v_c(l) = \frac{1}{c_0(1-c_0)} \left( \overline{c(\vec{R}, l)} - \langle \overline{c(\vec{R}, l) \rangle}_R \right)^2 \quad (2)$$

где  $\overline{c(\vec{R}, l)} = \frac{1}{l^D} \int_{K(l)} c(\vec{R} + \vec{r}) dr^D$  – объемная концентрация ключевого компонента в пробе размером  $l$ , взятой в окрестности точки  $\vec{R}$ ;

$c_0$  – объемная доля ключевого компонента во всей смеси;

$D = 1, 2, 3$  – размерность пространства;

$\int_{K(l)} dr^D$  обозначает интегрирование по  $D$ -мерному кубу с ребром длины  $l$  и с центром в точке  $\vec{R}$ ;

$\vec{r}$  – радиус-вектор, определяющий положение частицы ключевого компонента.



## ОПИСАНИЕ БЛОК-СХЕМЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ

На рис. 2 представлена блок-схема осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси, получаемой в барабанно-лопастном агрегате.

Кратко рассмотрим этапы осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси в соответствии с данной блок-схемой. На первом этапе устанавливаются ограничения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на отклонения текущего значения критерия  $V_c$  качества (однородности) получаемой смеси от ее заданного значения  $[V_c]$ .

4) задают блоки 9-12. При выполнении условия заданного в блоке 5 осуществляются конструктивные изменения, определяемые блоком 6.

В основу системы контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанно-лопастном агрегате непрерывного действия положена методика бесконтактного определения качества смеси по изображению плоского сечения рабочего объема. Методика позволяет фиксировать качество смеси, исследовать эволюцию однородности перерабатываемой смеси, не внося искажений в пространственное распределение частиц компонентов в любой точке сечения рабочего объема на выходе смесителя и не прерывая его работу.

О качестве смеси, получаемой в барабанно-лопастном аппарате непрерывного действия можно судить по распре-

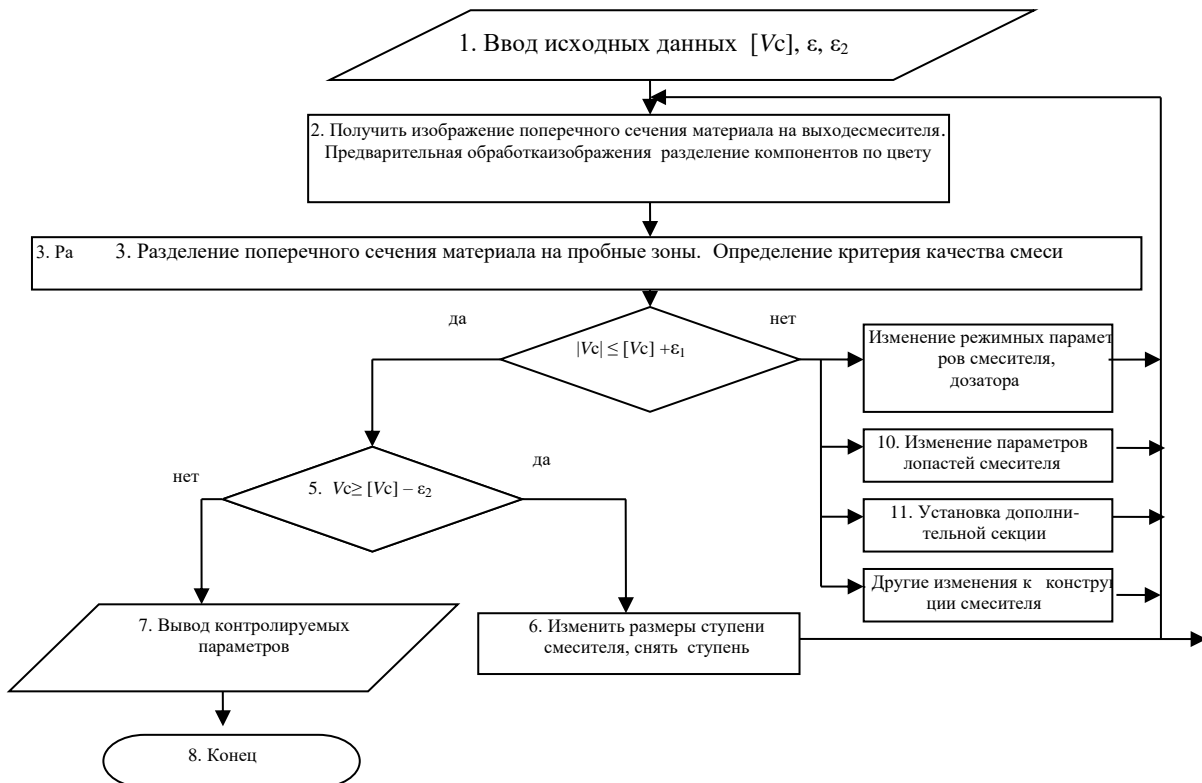


Рис. 2. Блок-схема осуществления контроля и корректировки качества сыпучей смеси в барабанно-лопастном агрегате непрерывного действия

Fig. 2. Flowchart for monitoring and adjusting the quality of the bulk mixture

Методику определения критерия качества смеси отражают блоки 2 и 3 на схеме, представленной на рис. 2. Контроль ограничений  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  осуществляется блоками 4 и 5. Ограничение  $\varepsilon_1$  определяет предельно допустимое верхнее значение критерия  $V_c$  (допустимую неоднородность смеси), а  $\varepsilon_2$  – предельно допустимое нижнее значение критерия  $V_c$  (допустимую однородность смеси). То есть

$$[V_c] - \varepsilon_2 \leq V_c \leq [V_c] + \varepsilon_1 \quad (3)$$

Следует отметить, что  $\varepsilon_2$  устанавливает ограничение неоправданного роста металлоемкости смесительного оборудования.

Корректировки параметров смесительной системы при невыполнении условия, определенного ограничением  $\varepsilon_1$  (блок

делению частиц смешиваемых фракций в сечении, перпендикулярном оси устройства на выходе из него, на фронтальной поверхности сыпучей массы, которую можно сделать доступной для непосредственного визуального наблюдения и фиксации изображения (например, цифровой видеосъемкой). В свою очередь, анализ получаемых при этом плоских распределений может быть легко осуществлен с помощью современных методов компьютерной обработки изображений.

## МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСИ

Традиционные методы [1, 2, 7], предусматривающие отбор контрольных проб по всему объему сыпучей массы с



последующим их анализом, как правило, не вполне удовлетворяют этим требованиям, даже если предполагают использование сложного оборудования для отбора и анализа проб. Современные методы исследования процессов смешивания требуют оценки вкладов в них конвективных и диффузионных механизмов смешивания, непосредственно связанных с конструктивными особенностями смесителя и физико-механическими характеристиками смесей [18]. Поэтому, при оценке качества смеси необходимо сохранение наиболее полной информации о ее структуре на микроскопических (сравнимых с размером частицы) и на макроскопических (порядка размеров рабочего объема смесителя) масштабах [1, 2, 13]. Это может быть обеспечено использованием бесконтактных методов анализа смеси непосредственно в устройстве или в потоке на выходе из него и применением для оценки качества смеси новых спектральных критериев, учитывающих степень однородности пространственного распределения ключевого компонента в широком спектре масштабов.

Рассмотрим подробнее бесконтактный метод [4, 13], который был использован для практической оценки качества смеси в процессе ее переработки в барабанных устройствах непрерывного действия. Стенка 8 корпуса смесителя 1 (рис. 1), примыкающая к боковой поверхности рабочего объема, выполнена из прозрачного материала, что обеспечило возможность визуального контроля, фиксации и цифрового анализа процесса смешивания. Черно-белое фотографическое изображение поверхности рабочего объема смесителя подвергается компьютерной обработке, в ходе которой на фотографии сначала отделяется область, занятая смесью (рис. 3).

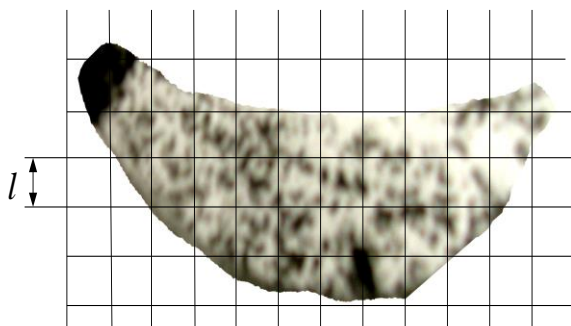


Рис. 3. Отделение сечения, занятого смесью, и разбиение на пробные зоны

Fig. 3. Separating the section occupied by the mixture and dividing it into test zones

Эта область разбивается на квадратные пробные зоны одинакового размера  $l$ , в каждой из которых концентрация ключевого компонента  $c_i^{(2D)}$  вычисляется как отношение площади зоны, занятой ключевым компонентом, к площади всей зоны.

При этом точка отделения ключевого компонента от несущего на шкале оттенков серого цвета определяется как точка минимума многочлена четвертой степени, аппроксимирующего распределение пикселей (рис. 4).

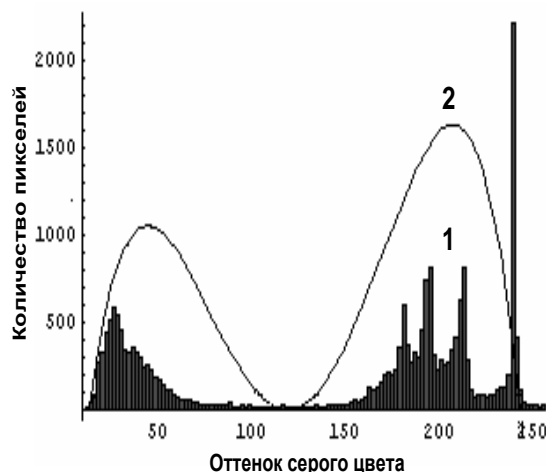


Рис. 4. Определение точки отделения ключевого компонента на шкале оттенков серого цвета: 1 – распределение пикселей по оттенкам серого цвета;

2 – аппроксимация распределения многочленом четвертой степени

Fig. 4. Determining the separation point of a key component on the grayscale:

1 – distribution of pixels by grayscale;

2 – approximation of the distribution by a fourth-degree polynomial

Затем по найденным концентрациям  $c_i^{(2D)}$  вычисляется коэффициент неоднородности  $V_c^{(2D)}$ . Полученный коэффициент неоднородности концентрации ключевого компонента смеси на плоском изображении  $V_c^{(2D)}$  может отличаться от коэффициента вариации, полученного традиционным способом на основе анализа объемных проб  $V_c$  при одной и той же концентрации в примыкающей к пробной зоне участке объемного слоя, так как на фиксируемой поверхности зоны может оказаться различное число частиц ключевого компонента.

Оценка дополнительного разброса объемного коэффициента неоднородности [4] и определяется пределами:

$$V_c = \sqrt{\max(0, (V_c^{(2D)})^2 - 3\sigma)} \div \sqrt{(V_c^{(2D)})^2 + 3\sigma}, \quad (4)$$

$$\text{где } \sigma = 4(d/l)\sqrt{(1-c_0)/c_0n}.$$

Таким образом, методика бесконтактного контроля качества смеси должна включать следующую последовательность операций:

- получение (фиксация) изображения сечения рабочего объема через прозрачную стенку 8 (рис. 1);
- выделение и предварительная обработка части области занятой смесью (рис. 3);
- нахождение точки отделения ключевого компонента от несущего на шкале оттенков серого цвета (рис. 4);
- разделение сечения смеси на пробные участки и вычисление критерия качества:

– вычисление объемного коэффициента неоднородности.

Для реализации указанной последовательности использована компьютерная программа [16]. Таким образом, изложенный бесконтактный метод оценки однородности смеси предполагает последовательную в течение процесса



фиксацию изображений плоских поверхностных распределений частиц смешиваемых компонентов, их компьютерную обработку с целью получения статистических характеристик и вычисление реальных критериев однородности. Методика позволяет значительно повысить исследовательские возможности по определению качества смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
2. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. М.: 1985. 440 с.
3. **Таршиш М.Ю., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации: моногр. Ярославль: Изд. дом ЯГТУ. 2011. 100 с.
4. **Таршиш М.Ю., Королев Л.В., Зайцев А. И.** Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент: моногр. Ярославль: Изд. дом ЯГТУ. 2015. 116 с.
5. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Патент РФ № 2626203. 2017.
6. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И.** Патент РФ № 2618065. 2017.
7. **Prigozhin L., Kalman H.** Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment. *Phys. Rev. E* 57. 1998. P. 2073-2080.
8. **Lai C.-K., Holt D., Leung J.C., Cooney C.L., Raju G.K., Hansen P.** Real time and noninvasive monitoring of dry powder blend homogeneity. *AIChE J.* 2001. V. 47. P. 2618.
9. **Unger D.R., Muzzio F. J.** Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets. *AIChE J.* 1999. V. 45. P. 477.
10. **Hill K.M., Caprihan A., Kakalios J.** Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V.78. P. 50.
11. **Kuperman V.Y.** Nuclear Magnetic Resonance Measurements of Diffusion in Granular Media. *Phys. Rev. Lett.* 1996. V.77. P. 1178.
12. **Шубин И.Н.** Разработка конструкций и методики расчета гравитационных смесителей для сыпучих материалов. Автореф. дисс. канд техн. наук. Тамбов. 2002. 16 с.
13. **Королев Л.В., Таршиш М.Ю.** Метод оценки качества смешения сыпучих материалов по распределению частиц в плоском сечении рабочего объема. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2002. Т. 45. Вып. 1. С. 98-100.
14. **Таршиш М.Ю., Черницкий С.Н., Королев Л.В., Капранова А.Б.** Патент РФ № 2690539. 2019.
15. **Королев Л.В., Таршиш М.Ю.** Спектральный критерий однородности смеси и его применение для характеристики процессов смешивания. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2002. Т. 45. Вып. 7. С. 99-101.
16. **Волков М.В.** Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабо-

чей камерой. Дисс. канд. техн. наук. Ярославль. 2014. 137 с.

17. **Черницкий, С.Н., Таршиш М.Ю., Королев Л.В.** Разработка эффективных методов и критериев оценки качества смешивания сыпучих материалов: Межд. науч.-техн. форум. Первые межд. Косыгинские чтения. 2017. Т. 1. С. 197-199.
18. **Fan L.T., Chen Y.M., Lai F. S.** Recent developments in solid mixing. *Powder Technol.* 1990. V. 61. P. 255-287.

Поступила в редакцию 15.09.2020

Принята к опубликованию 16.10.2020

## REFERENCES

1. **Makarov Yu.I.** Apparatuses for bulk materials mixing. M.: mechanical engineering. 1973. 216 p. (in Russian).
2. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu.** System analysis of chemical technology processes. Grinding and mixing processes of bulk materials. M.: 1985. 440 p. (in Russian).
3. **Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I.** Theory and principles of modeling the process of mixing bulk materials and creating devices with flexible elements for its implementation. Monograph. Yaroslavl: YAGTU Publishing House. 2011. 100 p. (in Russian).
4. **Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I.** Research of the quality of a loose mixture. Modeling. Criteria. Experiment. Monograph. Yaroslavl: YAGTU Publishing House, 2015. 116 p. (in Russian).
5. **Tarshis M. Yu., Cherpitsky S. N., Korolev L. V., Zaitsev A. I.** Patent RU N 2626203. 2017 (in Russian).
6. **Tarshis M. Yu., Cherpitsky S. N., Korolev L. V., Zaitsev A. I.** Patent RU N 2618065. 2017 (in Russian).
7. **Prigozhin L., Kalman H.** Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment. *Phys. Rev. E.* 57. 1998. P. 2073-2080.
8. **Lai C.-K., Holt D., Leung J.C., Cooney C.L., Raju G.K., Hansen P.** Real time and noninvasive monitoring of dry powder blend homogeneity. *AIChE J.* 2001. V. 47. P. 2618.
9. **Unger D.R., Muzzio F. J.** Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets. *AIChE J.* 1999. V. 45. P. 477.
10. **Hill K.M., Caprihan A., Kakalios J.** Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V.78. P. 50.
11. **Kuperman V.Y.** Nuclear Magnetic Resonance Measurements of Diffusion in Granular Media. *Phys. Rev. Lett.* 1996. V.77. P. 1178.
12. **Shubin I.N.** Development of designs and calculation methods for gravity mixers for bulk materials. Author's abstract. Cand. techn. science. Diss. Tambov. 2002. 16 p. (in Russian).
13. **Korolev L.V., Tarshis M.Yu.** Method for assessing the quality of mixing of bulk materials by the distribution of particles in a flat section of the working volume. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* 2002. T. 45. I. 1. P. 98-100 (in Russian).
14. **Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N., Korolev L.V., Kapranova A.B.** Patent RU. N 2690539. 2019 (in Russian).
15. **Korolev L.V., Tarshis M.Yu.** Spectral criterion of homogeneity of a mixture and its application for the characteris-





- tics of mixing processes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* 2002. I. 7. P. 99-101 (in Russian).
16. **Volkov M.V.** Method of calculating the process of mixing bulk materials in a new apparatus with an open working chamber. *Cand. techn. science. Diss. Yaroslavl*, 2014. 137 p. (in Russian).
  17. **Cherpitsky S.N., Tarshis M.Yu., Korolev L.V.** Development of effective methods and criteria for assessing the quality of mixing bulk materials: *Int. sci. and techn. forum. First Kosygin's Readings.* 2017. V. 1. P. 197-199 (in Russian).
  18. **Fan L.T., Chen Y.M., Lai F.S.** Recent developments in solid mixing. *Powder Technol.* 1990. V. 61. P. 255-287

Received 15.09.2020

Accepted 16.10.2020



UDC 693.78

# SELECTION OF TECHNOLOGY FOR HIGHWAY ROAD SURFACE OVERHAUL

**V.Yu. Verbin, V.M. Dudin**

Vasiliy Yuryevich Verbin

E-mail: v.verbin@mail.ru

Vladimir Mihailovich Dudin

E-mail: dudinvm@ystu.ru

Hydraulic and Road Engineering Department, Yaroslavl State Technical University, 40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia

*In the construction and overhaul of roads, the complex-mechanized method is widely used. It is based on modern technologies, machines, and mechanisms. It leads to the maximum productivity, minimum cost, and optimal terms of work. There are many approaches to choosing technologies for construction. One of them is the technical and economic comparison of different technologies, which helps to consider many factors affecting the construction process in the most complete way. The proposed paper considers the use of such an approach to the choice of technology for the overhaul of road surface. Cold in-place recycling technology is offered as an innovation. Based on the calculations done during the comparison of different technologies for a particular road section, the paper provides the list of recommended actions prior to the selection of a particular technology.*

**Key words:** road surface, overhaul, cold in-place recycling, strength calculations, feasibility comparison

**For citation:**

Verbin V.Yu., Dudin V.M. Selection of technology for highway road surface overhaul. *Smart Composite in Construction*. 2020. V. 1. N 1. P. 65-70 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_65



## INTRODUCTION

Constantly increasing intensity of traffic on the highways of general use, increased loads on the axle of trucks require an increase in the load-bearing capacity of the road surface of the operated roads, which is achieved by reconstructing or overhauling the roads. Nowadays, along with the traditional methods of overhaul, reconstruction, and strengthening of road surface, fundamentally new technologies have appeared that meet the latest requirements of ever-increasing traffic volume, based on the latest achievements of science and technology. One such technology that most fully meets the requirements for road surface reinforcement is "cold in-place regeneration" or "recycling" [1, 2]. This technology consists of crushing and mixing the existing asphalt concrete surface and a layer of the underlying material with the addition of binders in order to obtain a strong, homogeneous road base – asphalt granulated concrete, which is a composite material with new properties that differ significantly from the original [3]. A new asphalt concrete pavement or surface treatment layer is subsequently laid on this base [3]. The result is a new road with improved physical and mechanical characteristics.

The main task of this technology is solved with the help of high-tech machinery – a recycler (Fig. 1).



Fig. 1. Wirtgen 2500 recycler during an overhaul of road surface in Yaroslavl region

Fine tuning systems of the recycler allow to achieve high quality mixing of components in the right proportion, which is the key to the quality of the regeneration

## RESULTS AND DISCUSSION

In order to substantiate the choice of cold in-place recycling technology, Wirtgen offers a certain algorithm of actions (Fig. 2) [3], which includes: collection and initial processing of data; preliminary and detailed studies to select the most rational composition of asphalt granulated concrete mixture; preliminary and final calculation of the road surface structure obtained after cold recycling; economic analysis of the efficiency of the designed reinforcement of road surface structure; comparing the proposed technology with known ones.

The determining factor when choosing a technology for road overhaul is primarily economic analysis. The choice stems from the need to reduce budget expenditures while reducing the time of construction and repair and minimizing the costs associated with the road closure or traffic reduction in the area of overhaul or reconstruction.

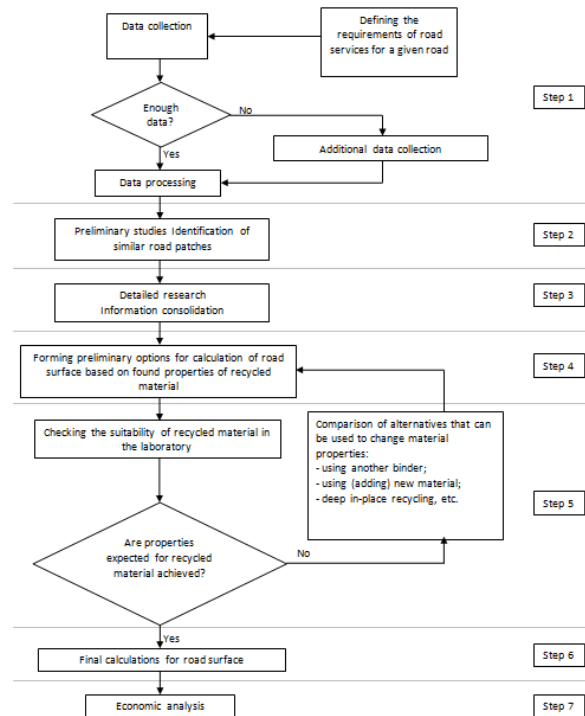


Fig. 2. Technology selection algorithm for road surface overhaul

The purpose of this paper is to develop a substantiation of the choice of the overhaul technology using technical and economic indicators.

The project of overhauling or reconstruction of a road section may be characterized by a number of technical and economic indicators that determine the degree of efficiency of the planned works, namely:

1. Estimated cost of construction and repair work.
2. Labor costs of workers and machines.
3. Mechanization and automation of work.
4. Material intensity of work.
5. Efficiency of subsequent operation of the road.
6. Special work conditions.

Estimated cost is the sum of money required for construction or overhaul according to the design materials. The estimated cost includes all construction costs, which are the purchase of materials, costs of operation of machines and mechanisms, labor costs of workers and machine operators, costs of administrative and managerial staff [4].

Estimated cost consists of the cost of works and estimated profit and it is calculated by the formula [4]:

$$C_{est} = C_{pr} + EP, \quad (1)$$



where  $C_{pr}$  – prime costs, RUB, in thousands;  $EP$  – estimated profit, RUB, in thousands.

Prime cost is the cash cost of construction, production, and services. Depending on how they are included in the cost of production, these costs are divided into direct and overhead (indirect). The largest part of construction costs are direct costs. They are determined based on the scope of work, cost estimates, and prices. The direct costs include: the basic salary of workers engaged in manual labor, the cost of materials, parts, and structures, the cost of operating construction equipment [4].

Overhead (indirect) costs are costs associated with the organization and management of construction and installation. Together with direct costs, they constitute the estimated cost of construction and installation [4].

The prime costs of construction and repairs is calculated [4]:

$$C_{pr} = DC + OC, \quad (2)$$

where  $DC$  – direct costs, RUB, in thousands;  $OC$  – overhead costs, RUB, in thousands.

Direct costs include expenditure items directly attributable to construction and repairs:

- the cost of materials;
- the cost of operating machines and mechanisms; wage fund (including salary costs for the main construction workers and machinery operators).

The formula for calculating direct costs is [4]:

$$DC = MC + MMC + WF, \quad (3)$$

where  $MC$  – cost of materials, RUB, in thousands;  $MMC$  – cost of operating machines and mechanisms, RUB, in thousands;  $WF$  – salary costs for construction workers and operators, RUB, in thousands.

Estimated profit is the sum of funds spent by the contractor on development of production, social services, and financial incentives for employees. Estimated profit, which are also called planned savings, as well as overhead costs, are calculated from the wage fund by type of work [4].

The cost of repairing one kilometer of road is calculated by the formula:

$$C_{km} = \frac{DC}{L}, \quad (4)$$

where  $DC$  – direct costs, RUB, in thousands;  $L$  – road length, km.

The cost of repairing 1000 m<sup>2</sup> of road is calculated by the formula:

$$C_{sq} = \frac{DC}{S} \quad (5)$$

where  $S$  – road surface, m<sup>2</sup>, in thousands.

To determine the level of profitability, the following formula will be used [4]:

$$P = \frac{EP}{C_{pr}} \cdot 100 \quad (6)$$

The material capacity is calculated by the formula [4, 5]:

$$M_{mat} = \frac{MC}{C_{est}} \cdot 100, \quad (7)$$

where  $MC$  – cost of materials, RUB, in thousands.

Important technical and economic indicators are the total and specific labor intensity of repairs.

Labor intensity is quantity of working time of a person spent on a unit of production [4]. To determine labor intensity of all kinds of works, we use the State Elementary Estimates Norms (SEEN) to determine labor costs for each job and then summarize their averages in each working category provided in the Norms. Using the formula 8, we determine the weighted average category of workers needed to perform the work, which will help to understand the average qualification of workers for a particular method of road repairs.

We calculate the weighted average of working categories as the arithmetic mean weighted by the formula [4, 5]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad (8)$$

where  $a_i$  – labor costs of workers of the  $x_i$ -th category, man-hours;  $x_i$  – worker category.

The average number of workers is calculated by the formula:

$$N = \frac{Q \cdot K_{con}}{8 \cdot t}, \quad (9)$$

where  $Q$  – total labor costs, from SEEN, man-hours;  $t$  – work completion period, shifts;  $K_{con} = 1,08$  – contingency factor [6].

An important indicator is the specific labor intensity of work, i.e. labor costs per 1 RUB. of the estimated cost of construction and installation –  $K_T$ . The indicator of specific labor intensity reflects the costs of labor in the construction and installation and characterizes the manufacturability of structural solutions of the object under construction and the level of mechanization of construction and installation.

The specific work intensity can be calculated by the following formulas [4]:

$$K_{Test} = \frac{T_0}{C_{est}}, \quad (10)$$

$$K_{Tv} = \frac{T_0}{L} \quad (11)$$

where  $T_0$  – total labor costs, man-hours;  $C_{est}$  – estimated repairs cost, RUB, in thousands;  $L$  – road length being repaired.

Another important indicator is the mechanical equipment ratio, which is the ratio of the cost of operation of machines and mechanisms ( $MMC$ ) required to perform work to the cost of construction and installation. A good mechanical equipment ratio is about 10-18%. This indicator is calculated by the formula [4]:

$$M_w = \frac{MMC \cdot 100}{C_{est}}. \quad (12)$$

Determining the composition of the brigade is an important element in the organization of the construction process. The overall efficiency of the work depends on the choice of the brigade elements.



The shift cost of brigade operation is a sum of the products of the cost of one hour of equipment operation, the number of required units, and the work duration per shift [4, 5]:

**Table. Summary table of technical and economic indicators of methods of overhaul of a road section**

Indicator	Repair method		
	Traditional method	Existing method from submittals	Cold in-place recycling
Strength characteristics of the finished roadway structure, MPa	291	299	399*
Strength reserve factor	1.19	1.16	1.6*
Direct costs, RUB, in thousands:			
– full road length	73 823.62	89 724.77	65 087.52*
– per 1 km	10 851.63	13 189.00	9 806.62*
– per 1000 m <sup>2</sup>	1 808.61	2 198.17	1 634.44*
Materials, RUB, in thousands	64 394.39	83 213.87	53 600.14*
Operation of machines and mechanisms, RUB, in thousands	9 109.26	6 174.57*	11 133.08
Wage fund, RUB, in thousands	733.68*	658.97	732.58
Overhead expenses, RUB, in thousands	1 013.80	913.12*	1 037.48
Estimated profit, RUB, in thousands	569.85	519.16	589.43*
Prime cost, RUB, in thousands	74 837.42	90 637.89	66 125*
Estimated cost, RUB, in thousands	75 407.27	91 157.05	66 714.43*
Profitability, %	7.5	5.7	8.8*
Material intensity, %	86.0	91.8	81.1*
Average-weighted worker category	3.4	3.8	3.4*
Average number of workers	21*	21*	23
Specific labor intensity indicator			
– K <sub>т</sub>	0.069	0.057*	0.085
– K <sub>тв</sub>	760.0*	763.0	838.0
Mechanical equipment ratio, %	12.2	6.8	16.8*
Total number of units of equipment in the brigade	29	17	16*
Cost of one shift of the brigade operation, RUB, in thousands	260.36	239.99*	315.56
Number of technological operations	39	29*	31
Technological break, days	–	–	7
Maintenance cost, RUB, in thousands	1 085.1	1 314.2	958.8
Special work conditions	Road closure and a temporary bypass	Traffic on one half of the roadway*	Traffic on one half of the roadway*

Note: \*- optimal values for different overhaul technologies

$$C_{sift} = \sum_{i=1}^j C_{mch}^i \cdot n_i \cdot t_i, \quad (13)$$

where  $C_{mch}^i$  – operation cost of one machine-hour, RUB;  $n_i$  – number of operated equipment units;  $t_i$  – work duration per shift, hours.

Let us consider the application of the given approach for the selection of technology of overhaul using a section of a highway Tunoshna - Burmakino as an example. This highway is in the Yaroslavl region, technical category IV, 6,803 km long [7].

Let us consider three construction technologies: traditional [8], from submittals [7], and cold in-place recycling [3]. The traditional method of repairs includes disassembling the asphalt concrete surface and the base, installing a new layer of crushed stone base and a two-layer asphalt concrete surface. The technology from the existing submittals includes the milling of the existing road surface, the levelling of the asphalt concrete mixture and the

construction of a two-layer asphalt concrete surface. Cold in-place recycling technology includes the recycling of the existing asphalt concrete surface and base layer to produce an asphalt granulated concrete mixture. In this example, let us consider the method of roadway strengthening by cementing [9] with the addition of 3% of CEM I 42,5N grade cement. Based on the experimental studies [10-12] conducted in the laboratory of road facilities of YSTU, we selected the cement quantity and the ratio of asphalt concrete mass to the mass of crushed stone base, which is captured by a cold planer installed on the recycler.

For each technology, the road surface was calculated using PNST 265-2018 [13]. Recommendations of PNST 184-2019 and GOST 58406.2-2020 were taken into account in the development of roadway structure. After that, construction operations were compiled in a list, their scope was determined, construction equipment was selected, process flowcharts were drawn up. Process flowcharts for the traditional method of overhaul and tech-



nology from existing submittals were developed with the recommendations of SP 78 [8] taken into account. Then, based on the federal estimate and regulatory framework of 2001 in the 2017 edition with changes No. 4, as well as the base index method with the index of conversion to the current prices for the 1st quarter of 2020, local cost sheets have been composed for each repair method.

The results of calculations are summarized in Table.

Table shows the indices from 1 to 19, which are determined by strength and technological calculations and calculations that follow the formulas above. The contents of indices 20-22 require some clarification.

Cement was chosen as the binder for the cold in-place recycling technology with a mineral binder. Laboratory research has shown that a seven-day technological break is required to set up a recycled base of sufficient strength. During this period, the structural layer will gain initial strength which will not allow the material to collapse under the influence of internal stresses at the strength gain of asphalt granulated concrete and the load of construction equipment. For other methods, no technological breaks are required. One of the most important factors is the cost of maintaining the road.

Scheduled and quality road maintenance ensures maximum service life of the roadway, keeping its main technical parameters at the normative level.

The scope of work includes (Recommendations of GOST 33180-2014. Automobile roads of general use. Requirements for summer maintenance level, GOST 33181-2014. Automobile roads of general use. Requirements for winter maintenance level):

1. Work on right-of-way, earth bed, and drainage system:
  - removing debris from the right-of-way, the curb;
  - cleaning and profiling of roadside ditches;
  - backfilling and layout of the natural side of the road;
  - cleaning culverts, drains;
  - planning of embankments and excavations with damage correction of the reinforced part.
2. Work on road surface:
  - cleaning up the garbage and dirt on the roadway;
  - restoring the adherence of the coating;
  - eliminating deformation and damage to the coating such as potholes, paintwork, cracks;
  - eliminating the rut;
  - restoring the transverse profile and evenness of the road.
3. Work on artificial and protective road structures:
  - cleaning the bridges and sidewalks, spans, staircases from dust and dirt;
  - fixing culverts, drainage trays;
  - painting metal structures of spans and supports;
  - restructuring cracks, deformation joints on the bridge bed.
4. Work on elements of arrangement of roadways:
  - cleaning and washing road signs, pedestrian, barrier, rope fences;
  - repainting and restoring the old road markings;
  - painting the elements of furnishing and arrangement of roadways.

5. Work on winter maintenance:

- maintaining permanent snow protection structures;
- preparing, installing, relocating and cleaning temporary snow protection structures;
- mechanized snow clearing with snow removal;
- fighting against winter slipperiness, distributing anti-icing materials;
- cleaning culverts in spring.

According to Supplement N 14 [5], annual road maintenance costs range from 0,68 to 1,5% of the cost of road surface.

In this example, only one road is considered, and it is repaired by different methods, therefore, the elements of arrangement, artificial structures, and the earth bed do not change, and respectively, the cost of maintaining these elements will be equal.

Based on this information, it is possible to compare the annual maintenance costs of a road after its overhaul by calculating the annual maintenance cost using the formula [4]:

$$C_{\text{maint}} = \frac{C_{\text{pr}} \cdot K_{\text{yr}}}{100}, \quad (14)$$

where  $K_{\text{yr}}$  – annual maintenance costs, %.

According to Supplement N 14 [5], the technical category IV road with an asphalt concrete pavement  $K_{\text{yr}}$  will be 1,45%. Respectively, we will calculate the cost of annual road maintenance after major repairs by each method:

$$C_{\text{maint}}^{\text{TR}} = \frac{74,837,42 \cdot 1,45}{100} = 1,085,1 \text{ thousand rubles};$$

$$C_{\text{maint}}^{\text{Subm}} = \frac{90,637,89 \cdot 1,45}{100} = 1,314,2 \text{ thousand rubles};$$

$$C_{\text{maint}}^{\text{CIR}} = \frac{66,125 \cdot 1,45}{100} = 958,8 \text{ thousand rubles};$$

As a result, it will turn out that the cost of maintaining a section of the road repaired using the technology from submittals is 37% more expensive than the cold in-place recycling method and 21% more expensive than the traditional method, which indicates the lack of efficiency of this repair method. The cold in-place regeneration method wins the traditional method by about 13%.

An important factor in the economic efficiency of a roadway is the work conditions. When performing work using the traditional method, it is necessary to close a road section or organize temporary roads, which is an additional cost of large volumes of imported material (sand, sandy soil), work on the embankment of a temporary road, remove them after the main work and then restore the roadside. All this entails additional costs. If the road is fully closed, it affects the economic component of the area, as the efficiency of transport links decreases.

In case of overhaul using technology from existing submittals and cold in-place recycling, the repair can be done in lanes. Yes, it reduces the economic efficiency of the road, as the capacity of the road becomes reduced, but if the contractor works properly, this reduction is minimal.

The structure of the roadway repaired by cold in-place recycling has greater strength, the elasticity modulo of the resulting structure is almost 35% higher than other methods. The strength reserve factor shows that such a design has a large safety margin (60%) in strength compared to other design solutions. This will ensure the required overhaul time.



In terms of direct costs and prime costs of construction, cold in-place recycling technology is also the most profitable. The cost of this method is 13% and 37% lower than the cost of the traditional method and the method chosen in the existing submittals respectively. For the customer's services, these figures are a great help in case of any doubts about the selection of the overhaul method.

Indices of profitability also show cold in-place recycling as the most profitable repair option, allowing to receive the planned profit at a rate of 8.8% from cost of construction; it is 14% higher than traditional repair and 54% higher than a method from the existing submittals.

Materials make up a huge share of direct costs when working with the method from submittals. In this type of repair, there is an increased consumption of asphalt concrete mixtures, which have the highest price of all materials used in the construction and repair of roadways. This method, as well as the traditional method, has increased volumes of imported materials, as old materials are not used, as opposed to cold in-place recycling.

The traditional method of repair requires a large amount of removal of old material and delivery of new inert materials, which leads to the need to use a large number of dump trucks. According to this indicator, cold in-place recycling also saves on technology, as all work is done on site without unnecessary transportation costs.

A large part of the budget is spent on road maintenance. These savings will make it possible to direct the remaining funds to the running repair of another part of the road. The cold in-place recycling method saves money on road maintenance.

Closure of roads is a big problem that occurs during major repairs. The construction of temporary roads is not always possible due to the impossibility of placing these roads within the right-of-way, as well as in terms of material costs and work on construction and liquidation of these roads, and repair of the roadside. In this case, the lane-by-lane work is a huge advantage. Both the existing method from the submittals and the cold in-place recycling have these advantages.

## CONCLUSION

When choosing technologies for road overhaul, it is advisable to select technologies that will strengthen the structure of the road surface. For a reasonable choice of technology and road equipment, it is reasonable to perform a set of preliminary and final studies and calculations. The performed technical and economic analysis has shown that cold in-place recycling is undoubtedly promising when used in the overhaul of road surface.

## REFERENCES

1. **Gornaev N.A.** Technology of cold regeneration of asphalt concrete. *Nauka I tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2005. N 3. P. 43-44. (in Russian).

2. **Evstegneeva V.N., Stepanets V.G.** Repair and reconstruction of asphalt-concrete pavements by cold in-place recycling. *Molodoi uchenyj*. 2017. N. 38. P. 21-28. (in Russian).
3. Cold in-place recycling technology. *Wirtgen manual*. 2012. 370 p.
4. **Gavrish V.V.** The economy of road construction. Part 1. Krasnoyarsk: Sib. fed. un-t. 2013. 478 p. (in Russian).
5. **Avseenko A.A., Kikava N.P.** Methodological guidelines for the economic justification of decisions in road design. M.: MADI. 2011. 59 p. (in Russian).
6. MDS 81-35.2004. Methodology to determine the cost of construction products in the Russian Federation. M: Gosstroy Rossii. 2004. 61 p. (in Russian).
7. Repair of the Tunoshna-Burmakino roadway section in Yaroslavl Municipal District, Yaroslavl Region. The project. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/documents.html?regNumber=0171200001920000006&backUrl=1ee573f9-7006-4e97-b512-819d9b08e330> (in Russian).
8. SP 78.13330.2012. Automobile roads. M: Standardinform. 2012. 99 p. (in Russian).
9. **Dudin V.M., Ignat'yev A.A.** Soil stabilization in highway construction: monogr. Yaroslavl: YSTU Publishing House. 2016. 165 p. (in Russian).
10. **Artemyeva L.A., Dudin V.M.** Selection of mixture composition at cold in-place recycling. *Sb. mat. 73 vseros. nauchn.-tekhn. konf. stud., magistr. i aspir. vyssh. uchebn. zaved. s mezhd. uch.* Yaroslavl. 2020. P. 632-637. (in Russian).
11. **Rybakov M.A., Verbin V.Yu., Dudin V.M.** Volumetric design methods based on the selection of particle size distribution of the mixture during cold in-place recycling. *Sb. mat. 72 vseros. nauchn.-tekhn. konf. stud., magistr. i aspir. vyssh. uchebn. zaved. s mezhd. uch.* Yaroslavl. 2020. P. 660-665. (in Russian).
12. **Krivchikov Yu.I., Dudin V.M.** Influence of the mineral binder on the strength of asphalt granulated concrete in cold in-place recycling. *Matematika i estestvennye nauki. Teoriya i praktika*. Sci. works compilation. Yaroslavl: YSTU Publ. House. 2020. V. 15. P. 164-168. (in Russian).
13. PNST 265-2018. Automobile roads of general use. Flexible pavement design. M.: Standartinform. 2018. 79 p. (in Russian).

Received 17.09.2020

Accepted 20.10.2020



УДК 72.017:721.011

# *ПРОБЛЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДИ ПУШКИНА В ГОРОДЕ ИВАНОВО*

*А.В. Захаров<sup>1</sup>, Н. А. Исаева<sup>2</sup>, М.Ю. Покровская<sup>2</sup>*

*Александр Владимирович Захаров<sup>1</sup>  
E-mail: avz-arch@rambler.ru*

*Группа предприятий «Квартал», ул. Зверева, 17, Иваново,  
Российская Федерация, 150000*

*Наталья Адольфовна Исаева<sup>2</sup>  
E-mail: nino2014nino@yandex.ru*

*Кафедра дизайна костюма и текстиля, Ивановский  
государственный политехнический университет, пр-т  
Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 150000*

*Марина Юрьевна Покровская<sup>2</sup>  
E-mail: marina59b@mail.ru*

*Кафедра архитектуры и строительства, Институт  
Архитектуры строительства и транспорта, Ивановский  
государственный политехнический университет, пр-т  
Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 150000*





*В работе ставится проблема изучения морфологии общественного пространства на примере одной из главных площадей города Иваново. Рассмотрено влияние на формирование городских площадей различных факторов (ландшафт участка, транспортные коммуникации, социокультурные и временные факторы). Изучена особенность пространственной организации площади на различных временных этапах ее формирования. Определена роль общественных зданий, влияние их на формирование художественного образа, ансамблевой и архитектурной стилистики общественных пространств.*

*Проанализирована архитектура возводимых сооружений и их взаимовлияние друг на друга, а также на геометрию пространства. Обращено внимание на проблему взаимодействия старого и нового, их совместного существования в структуре площади. Выявлены направления, по которым могут развиваться пространства площадей в исторических центрах городов. Подчеркнуты особенности визуального восприятия пространства площади, влияние высотной застройки на масштабность и визуальный комфорт. Высотные здания либо дополняют визуальные панорамы пространства, либо вступают в противоречия с существующими объемами площадей.*

*Рассмотрены приемы нивелирования ошибок городской застройки при формировании площадей. Предлагаются два пути их исправления – применение современных технологий остекления поверхностей зданий и графического дизайн (граффити).*

**Ключевые слова:** *формирование площадей, морфология, визуальное состояние пространства, диссонанс, архитектурная стилистика общественных пространств*

**Для цитирования:**

*Захаров А.В., Исаева Н.А., Покровская М.Ю. Проблемы пространственной организации на примере площади Пушкина в городе Иваново. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 71-80 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_71



UDC 72.017:721.011

# SPATIAL ORGANIZATION PROBLEMS (PUSHKIN SQUARE, IVANOVO)

**A.V. Zakharov<sup>1</sup>, N.A. Isaeva<sup>2</sup>, M.Yu. Pokrovskaya<sup>2</sup>**

*Aleksandr Vladimirovich Zakharov<sup>1</sup>*  
E-mail: avz-arch@rambler.ru

*Kvartal (group of companies), Zvereva str., 17, Ivanovo, Russia, 150000*

*Natal'ya Adolfovna Isaeva<sup>2</sup>*  
E-mail: nino2014nino@yandex.ru

*Department of Costume and Textile Design, Institute of Architecture, Construction, and Transport, Ivanovo State Polytechnical University, 21, Sheremetevsky Prosp., Ivanovo, Russia, 150000*

*Marina Yurievna Pokrovskaya<sup>2</sup>*  
E-mail: mapina59b@mail.ru

*Department of Architecture and Construction, Institute of Architecture, Construction, and Transport, Ivanovo State Polytechnical University, 21, Sheremetevsky Prosp., Ivanovo, Russia, 150000*



*The paper studies the problem of studying the morphology of public space based on one of the main squares of Ivanovo, Russia. It considers the influence of different factors (site landscape, transport communications, socio-cultural and temporal factors) on the shaping of urban areas. The study includes the analysis of specific aspects of spatial organization at different stages of its formation. The paper defines the role of public buildings, their influence on the building up the artistic image, ensemble, and architectural stylistics of a public space.*

*We have analyzed the architecture of the erected structures and their mutual influence on each other as well as on the geometry of the space. The study draws attention to the problem of inter-action of the old and the new, their coexistence in the structure of the square. We have identified the directions for the development of space in the historic city center. The paper highlights the visual perception of the square's space, the influence of high-rise development on the scale of the square and its visual comfort. The tall buildings either complement the visual panoramas of the space or clash with the existing square.*

*The study considers the methods of leveling errors of urban development in the formation of squares. Two ways to fix it are proposed — modern technologies of glazing the surfaces of buildings and graphic design (graffiti).*

**Key words:** *square formation, morphology, visual state of space, dissonance, architectural style of public spaces*

**For citation:**

*Zakharov A.V., Isaeva N.A., Pokrovskaya M.Yu. Problems of spatial organization on the example of Pushkin square in Ivanovo. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 71-80 URL:*

*[http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** *10.52957/27821919\_2020\_1\_71*



Современный взгляд на проблему структурной организации площадей и ее морфологическую основу выявляет ряд вопросов при формировании городских пространств. По сути, в большинстве городов пространство площади уже заложено в понятии «город».

В планировочной организации современного города, в отличие от древних городов, складывается система площадей, расширяется их типология. Актуальность обращения к городской тематике на постсоветском пространстве, во-первых, обусловлена возникновением новых объектов – феноменов, требующих отдельного рассмотрения. Во-вторых, она связана с появлением у горожан возможности принимать непосредственное участие в конструировании городской среды. Активная позиция жителей города может быть расценена как индикатор трансформационных процессов, происходящих в рамках большого города, в частности, изменений значимости тех или иных объектов в соответствии с изменяющимися потребностями населения [1].

Для анализа городской среды и происходящих в ее рамках социальных процессов используется специфичная терминология: «пространственная организация» или «пространственная форма организации», «городская морфология». При этом понятие городской морфологии рассматривается в ряду с такими понятиями, как физическое городское пространство, планирование городской среды, т.е. не предполагается непосредственное обращение к социокультурным характеристикам. В то же время именно в морфологии города заложен значительный потенциал, позволяющий говорить как о пространственных, географических характеристиках городской среды, так и об их социальной наполненности [1].

Морфология в архитектуре – часть архитектурной системы, объединяющая элементарные пространственные компоненты как носители структурных значений, законы их существования и формообразования. Морфологическая классификация архитектурных систем – классификация архитектурных систем, главным образом, по особенностям структуры элементарных пространственных элементов и их сочетаний [2].

В основе структурного метода лежит выявление архитектурного объекта как относительно устойчивой совокупности отношений; признание методологического примата отношений над элементами в системе; частичное отвлечение от развития объектов во времени [2].

Архитекторы в своем творчестве постоянно прорабатывают множество вариантов возможной объемно-пространственной и планировочной структуры будущей архитектурной формы. Творческий процесс проб и ошибок, поиск геометрических решений той или иной задачи определяет проблемы глубины геометрической проработки проекта, занимает много времени и требует большого психологического напряжения. Любая помощь по оптимизации этого процесса, рационализации принятия решений при отработке возможных вариантов полезна для архитектора-проектировщика. Также, очевидно, заведомое знание архитектором геометрических закономерностей построения определенного вида геометрических сетей, характерных особенностей их видов могло бы избавить его от тщетных попыток создания невыполнимого планировочного решения [2].

Пространства центральных площадей в городах чаще всего имеют определенную морфологию, связанную с ходом исторического развития градостроительной системы. В последнее время обсуждения проблем сохранения архитектурного наследия прошлого и включения современных объектов в застройку городов находят отражения в корректировках генеральных планов и при разработке проектов детальной планировки. Сложные задачи сочетания старого и нового в застройке нужно обдуманно и обоснованно решать и при реконструкции исторических центров городов. При том что в настоящее время большое внимание уделяется созданию комфортной городской среды, упускаются проблемы структурной организации пространства городского центра.

Площади, возникающие в центральной части города или на его периферии, являются наиболее значимыми элементами планировочного каркаса, учувствуют в формировании композиции центров обслуживания и производства. Они характеризуются высоким социокультурным, архитектурно-планировочным, транспортным потенциалом, проявляющимся в высокой емкости и плотности функциональной структуры, интенсивности пешеходных и транспортных потоков [3]. В создании городского ансамбля, в формировании стиля и образа архитектуры особую роль всегда играли общественные здания. Городская площадь является структурным проявлением социально-функциональных и психологических потребностей человека.

Большей части городские площади как крупных столичных городов, так и малых имеют общие характерные черты. Одна из них это геометрия, которая фокусирует и структурирует пространство. Поэтому, когда рассматриваем морфологию какой-либо площади, мы изучаем, как складывалась и развивалась ее геометрия.

Отсутствие организованной системы органов самоуправления привело к беспорядочному перераспределению земельных наделов и случайному характеру связей между ними. По этой причине в настоящее время города сталкиваются с перегруженностью центральной части. Кроме функциональных элементов общегородского уровня, на площадях реализуются различные формы деятельности – деловая, научная, культурная, просветительная, спортивная, оздоровительная, торговая. На площадях организуются общественные мероприятия, театрализованные праздники, спортивные фестивали, торжества, ярмарки, выставки и т. д.

Для рассмотрения проблем, возникающих в ходе развития пространств городских площадей, мы обратились к наиболее проблематичной площади г. Иваново – площади Пушкина (рис. 1). Одно из важнейших градостроительных узлов города на протяжении своего исторического развития постоянно подвергается переустройству, периодически возникают новые объемы, меняющие масштаб, пропорции, видовое восприятие этого участка территории города. Проблема взаимодействия старого и нового всегда будоражила умы архитекторов: как найти ту логическую цепочку их совместного существования, как сформировать пространство, которое мы называем площадью?

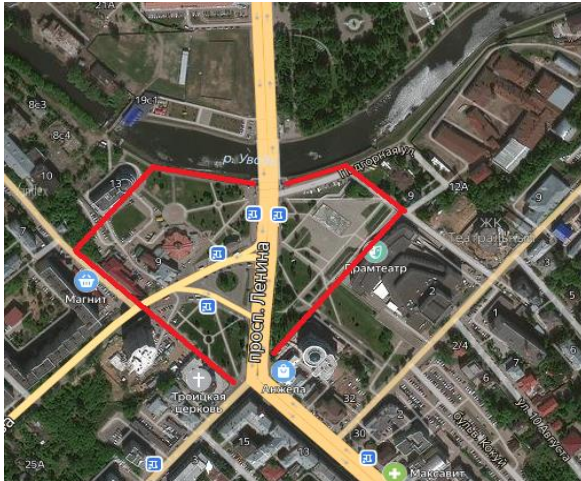


Рис. 1. Граница площади Пушкина в 2020 году  
Fig. 1. Border of Pushkin square in 2020

Площадь Пушкина расположена в исторической части города в непосредственной близости к реке Уводь. Своё название площадь получила в 1937 г., в честь столетия со дня смерти А.С. Пушкина, местечко Пески переименовали в площадь Пушкина [4].

Исторически сложилось, что в этом месте, на берегу реки Уводь на возвышенности Покровской горе, находился мужской монастырь. Центром объёмной композиции становится Покровский и Троицкий соборы.

Это место, являющееся не общественным центром села Иваново, а его окраиной, называли «Пески». Постепенно село разрасталось, и в 1871 г. оно было объединено с Вознесенским посадом, который располагался на левом берегу реки Уводь. Возник город Иваново-Вознесенск. Покровская гора, на которой располагался монастырь, перестала быть окраинным местом. Появилась первая транспортная коммуникация, которая разделила предместовое пространство на две части.

В 1931 г. Покровский и Троицкий соборы были снесены. А в 1932 г. по проекту архитектора А.В. Власова началось строительство одного из крупнейших в стране театров. Площадь Пушкина типологически становится театральной площадью, в связи с завершением в 1940 г. строительства театра с залом, рассчитанным на 1500 чел. По проекту предполагалось формирование максимально большого пространства перед театром для проведения демонстраций трудящихся, крупных массовых мероприятий, театрализованных представлений, присущих духу того времени. На площади перед ним был установлен памятник Сталину, что в принципе характерно для композиций площадей во всем мире. В 1959 г. памятник Сталину с площади Пушкина убрали [5].

Таким, каким мы видим театр сейчас, он стал после реконструкции, которая закончилась в 1987 г. Реконструкция началась через 8 лет после завершения строительства по причине неблагоприятных геологических условий. Протекавший и впадавший в реку Уводь ручей Кокуй при строительстве дворца был собран в коллекторную трубу, но это не спасло здание с высокой массой, фундаменты стали проседать. Основные внешние габариты здания и капитальные кирпичные стены были сохранены, и объем стал

доминировать в пространстве именно как массивная, а не вертикальная доминанта (рис. 2).



Рис.2. Дворец искусств в Иваново (после реконструкции в 1987 г.)

Fig. 2. The Palace of arts in Ivanovo (after reconstruction in 1987)

Геометрическое очертание пространства было изначально сформировано естественными природными преградами (река Уводь, ручей Кокуй) и транспортной коммуникацией, соединяющей село Иваново и Вознесенский Посад.

Анализируя развитие градостроительных систем, можно сделать вывод, что развитие пространства площадей в исторических центрах городов может идти по двум направлениям:

- площадь сохраняет свою геометрию на протяжении длительного времени, появляющиеся взамен исчезающих здания сохраняют ее масштабность, структурность;
- площадь начинает менять свою геометрию, увеличивается за счет свободных территорий или освобождающихся при ликвидации объектов ветхой застройки.

Если в первом варианте поиск архитектурных решений по сохранению морфотипа обусловлен сложившимися параметрами, во втором случае, при нынешнем градостроительном законодательстве, собственники участков не всегда прислушиваются к мнению архитектурного сообщества по созданию пространств площадей с учетом основ архитектурной композиции. Возникают новые объекты, нарушающие целостность, ансамблевость площадей.

Архитектурные объекты, которые формировали пл. Пушкина в городе Иваново, периодически изменяли ее масштаб, пропорции, геометрию плана.

Кроме доминирующего на площади объема здания театра, по соседству с ним на возвышенности появилось здание почтамта.

Почтамт расположен на природной возвышенности на правом берегу реки Уводь, поэтому на момент постройки являлся важной городской доминантой. Трехэтажное здание, близкое в плане к Г-образному, было построено в 1931 г. по проекту

Г.С. Гуревич-Гурьева в стиле конструктивизма. При строительстве использовали характерные для архитекторов-конструктивистов материалы – кирпич и железобетон.

В 1957 г. по проекту архитектора Александра Бодягина переформлился фасад почтамта в духе сталинской



Рис. 3. Возводимые объекты на площади Пушкина  
Fig. 3. Objects under Construction on Pushkin square

архитектуры с элементами неоклассицизма. Была перестроена башня по оси фасада со стороны проспекта Ленина: в верхней части были заложены вертикальные ленточные окна, появились новые башенные часы, карниз и балюстрада с обелисками-шпилями. Также были убраны угловые окна, сбиты балконы, примыкавшие к башне. Кирпичные стены оштукатурили и разделили под руст.

Градостроительным советом города Иваново от 9 июня 2005 г. был утвержден проект офисно-торгового центра архитектора Сергея Лося. Крупное объемное здание совершенно не вписалось в историческую застройку.

На противоположной от транспортной магистрали стороне (проспект Ленина) сохранилось историческое здание – Дом Кулакова постройки 1912 года, бывший Дом работников просвещения (просторечное прижившееся название – Дом учителя), а ныне объект культурного наследия регионального значения.

Границу с южной стороны площади зафиксировало здание бизнес-центра «Квадро Сити». Неудачным, на наш взгляд, решением было возведение на площади в 1997 г. зданий кафе «Вернисаж» (1997) и бистро «Морсен» (2013) (последнее у

городских обывателей получило название «Утюг»). В 2019 г. был приведен в порядок и благоустроен Троицкий сквер около Троицкой церкви.

Рядом с возведенным храмом фиксирует поворот дороги с площади на ул. Жарова многоэтажный жилой дом, возведенный в 2016 г. Расположившись на возвышенности, он стал доминировать в пространстве площади по высоте. Так сложилась довольно пестрая застройка, формирующая пространство площади (рис. 3).

Поиски по улучшению пространственной организации площади продолжают и на современном этапе (рис. 4).

В марте 2020 г. градостроительным советом утвержден проект реконструкции морально устаревшего здания кафе «Вернисаж» под здание торгово-развлекательного центра, который вызвал неоднозначное мнение не только архитектурного сообщества, но и граждан города, активно обсуждавших это решение в социальных сетях.



Рис. 4. 3Д-модель части площади Пушкина напротив здания Дворца искусств

Fig. 4. 3D model of part of Pushkin square opposite the Palace of arts building

Единственным, кто не согласился с предложенным решением и воздержался при голосовании, явился один из авторов настоящей статьи, ранее главный архитектор города Иваново. Было заявлено об островной концепции этого объекта, отсутствии пространственного фронта. «Этот объект не соответствует ни одному из окружающих его зданий, – отмечалось в общественном выступлении. – Он не отвечает историческому характеру застройки данного места. Архитектура своеобразна, индивидуальна, абсолютно парковая... Была бы она на противоположной стороне или ближе к «Серебряному городу»... А здесь не вижу городской центр в таком архитектурном стиле» [6].

Как сказал автор проекта Александр Лосев, что «...сама пойма представляет собой конгломерат объектов различных эпох, которые сами по себе имеют много позитивного содержания в историческом и архитектурном плане. Как пример, обратите внимание, в той части, которая нас интересует, размещаются объекты, которые совершенно, на первый взгляд, друг с другом не коррелируют. Их архитектурная составляющая относится к различным стилям, совершенно разные оси ориентации. Мы предлагаем закрепить это свойство, позиционировать его не как негативное, а как свойство, которое невыражено. ...Эти рассыпанные осколки в пределах поймы, с нашей точки зрения, должны стать тем свойством, которое надо подчеркнуть, и самым существенным инструментом для этого подчеркивания может быть благоустройство. Как песок, например, организует пространство в саду камней. И... хаотично разбросанные куски вдруг собираются в замечательную композицию...» [7].

Позиция автора интересна, но структура площади разваливается. Сомнительно, что единая концепция благоустройства сможет обеспечить создание уравновешенной объемно-пространственной композиции.

Не только внедряющиеся в структуру площадей здания вызывают спорные вопросы. На визуальное восприятие пространства влияет высотная застройка, концентрирующаяся в центре города. Она дополняет визуальные панорамы пространства либо вступает в противоречия с существующими объемами площадей.

На примере площади Пушкина можно наблюдать возникновение конфликта между объемами здания театра и строящегося многоэтажного жилого дома (рис. 5).



Рис. 5. Вид на здание театра и многоэтажный жилой дом

Fig. 5. View of the theater building and multi-storey residential building

Такие ситуации все чаще встречаются в исторических центрах городов при несоблюдении градостроительной дисциплины. Как уже упоминалось, новое высотное здание ни стилистически, ни геометрически не сочетается со зданием театра. Обратившись к архитектонике, несложно увидеть, что проектировщиком были нарушены правила компоновки элементов друг с другом.

Строящееся здание нарушает симметричную композицию пространства этой части площади Пушкина. Симметрия позволяет нам открывать своего рода структурный эталон для многих вещей. Она своими формами организации определяет своеобразную норму, к которой стремится все живое и неживое, хотя и не достигая ее, и в этом проявляется более глубокая и общая природа физического существования вещей. В истории архитектуры и искусства можно найти много примеров того, как архитекторы и художники рассматривали симметрию в качестве божественного начала, знания, данного свыше, наивысшего проявления чистого разума и порядка. Во всех случаях симметрия становилась вершиной совершенства в ее противостоянии хаосу и энтропии.

Здание Дворца искусств является памятником истории, и статус объекта архитектурного наследия оберегает здание от сноса, волюнтаристической реконструкции и самовольной переделки. Поэтому становится очевидным, что для возвращения театру роли доминанты пространства, работать нужно непосредственно со строящейся высоткой.

С появлением в строительстве новых архитектурных разработок внешний вид современных городов сильно изменился. Одно из самых популярных решений сегодня – фасад из стекла. Он имеет стильный внешний вид, кардинально преобразует наружные стены, выглядит изысканно, оригинально и отлично вписывается в архитектуру современных городов. Дизайн стеклянных, зеркальных фасадов отличается лаконичностью, в нем нет ничего лишнего.

Стеновое остекление зданий в последние годы активно применяют в архитектуре. Оно имеет массу преимуществ и характерных особенностей. Остекленные фасады позволяют зданию выглядеть элегантно и невесомым. На первый взгляд, стекло кажется хрупким материалом, однако благодаря использованию инновационных разработок оно обрело достаточную прочность, поэтому стало чаще



использоваться в интерьере и экстерьере строительных объектов [8].

Современный фасад из стекла имеет следующие преимущества:

– Внешний вид. Наружные стены из стекла смотрятся изысканно, оригинально и необычно, позволяя задействовать фантазию в полной мере.

– Светопрозрачность. Полностью прозрачные стены не препятствуют проникновению солнечного света, что важно для помещений с большим скоплением людей – торговые, коммерческие организации, вокзалы, аэропорты и прочие.

– Тепло-, звукоизоляция. Современные конструкции могут отлично сохранять тепло. Они производятся со стеклопакетов с определенным количеством камер, которые заполнены инертным газом, либо оклеены энергосберегающими пленками. Определенные виды стеклопакетов также помогают спастись от сильной жары [8].

Основной недостаток подобных изделий – высокая хрупкость в сравнении с другими вариантами. Несмотря на то что современные стекла производятся по инновационным технологиям, благодаря чему они приобрели повышенные прочностные характеристики, по сравнению с бетоном и кирпичом прочность изделий все же ниже. С другой стороны, грамотно спроектированная конструкция способна выдерживать большие нагрузки [9].

Качественные, правильно установленные фасады при минимальном уходе не теряют свой первоначальный вид десятилетиями.

Другим, более бюджетным решением, может стать использование суперграфики. Под понятием суперграфика следует понимать, как прием формирования гармоничной и удобной среды обитания человека, в том числе ее колористики на различных масштабных уровнях (соотношение с природным фоном, динамичный цветовой контекст, оптическая нейтрализация объемов и др.).

В отличие от кратковременного праздничного художественно-декоративного оформления, архитектурная суперграфика носит долгосрочный характер, становясь, несмотря на радикальный настрой, частью архитектурно-художественного ансамбля, зачастую определяющей его новое образно-семантическое содержание. Несмотря на то что суперграфика визуально изменяет объемную форму, вплоть до трансформации и даже разрушения, она, как правило, подчиняется общей логике градостроительной композиции, поддерживая ее ключевые позиции.

На взгляд авторов настоящей работы, рационально применить данный прием к новому зданию, активно используя оттенки голубого цвета, чтобы создать эффект «растворения» высотного здания на фоне неба.

В случае использования описанных способов преобразования строящегося здания появится возможность сохранить акцент на здании театра, не нарушая исторически сложившегося образа площади Пушкина в городе Иваново.

## ВЫВОДЫ

На примере площади Пушкина в городе Иваново рассмотрена проблема пространственной организации городских площадей, влияния урбанизации на облик исторического центра города. Предложены способы нивелирования ошибок

застройки, не предусмотренных при проектировании, чтобы, с одной стороны, не препятствовать развитию города и повышению уровня жизни в нем, а с другой стороны – свести к минимуму спорные решения размещения исторических зданий и современных построек в архитектурном пространстве.

## RESULTS

On the example of Pushkin square in the city of Ivanovo examined the problem of spatial organization of urban areas, effects of urbanization on the character of historic downtown. Suggested ways of leveling errors of construction not provided for in the design below, on the one hand, hinder the development of the city and increasing the standard of living, and on the other hand, to minimize the controversial decision host of historic buildings and modern structures in architectural space.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ломоносов URL: <http://lomonosov-msu.ru>
2. Architectural idea. URL: <https://architecturalidea.com>
3. Бакайкина М.А. Современные методы формирования городских площадей. Молодой ученый. 2019. №17 (255). С. 6-8. URL: <https://moluch.ru/archive/255/58450/>
4. Ивановский музыкальный театр. URL: <http://www.ivmuz.ru/history/>
5. Площадь Пушкина (Иваново). Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Площадь\\_Пушкина\\_\(Иваново\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Площадь_Пушкина_(Иваново))
6. Семенова А. Заказчик продавил «парковый» «Вернисаж». Слухи и факты <https://1000inf.ru/news/94667/>
7. «Вернисаж» наузнанку: что будет с площадью Пушкина? Слухи и факты <https://1000inf.ru/news/94116/>
8. Стекланные перегородки и двери, конструкции от компании «Гласстрой». URL: <https://glasstroy.ru>
9. Современные стекланные конструкции. URL: <https://www.glasstroy.ru/sovremennye-steklyannye-konstruktsii/fasad-iz-steklainnovacionnoe-reshenie-v-sovremennom>

Поступила в редакцию 11.09.2020

Принята к опубликованию 15.10.2020

## REFERENCES

10. Lomonosov. URL: <http://lomonosov-msu.ru>
11. Architectural idea. URL: <https://architecturalidea.com>
12. Bakaykina M.A. Modern methods for the formation of urban areas. Young scientist. 2019. N 17 (255). P. 6-8. URL: <https://moluch.ru/archive/255/58450/>
13. Ivanovo musical theater. URL: <http://www.ivmuz.ru/history/>
14. Pushkin Square (Ivanovo). Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Площадь\\_Пушкина\\_\(Иваново\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Площадь_Пушкина_(Иваново))
15. Semenova A. the Customer pushed the Park"Vernissage". Rumors and facts <https://1000inf.ru/news/94667/>
16. "Vernissage" inside out: what will happen to Pushkin square? Rumors and facts <https://1000inf.ru/news/94116/>





17. *Glass partition and doors, structures from the company «Glasstroy». URL: <https://glasstroy.ru>*

18. *Modern glass structures. URL: <https://www.glasstroy.ru/sovremennye-steklyannye-konstruktsii/fasad-iz-steklainnovacionnoe-reshenie-v-sovremennom>*

*Received 11.09.2020*

*Accepted 15.10.2020*



*УДК 05.23.21*

*ДЕВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАК МЕТОД  
НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА  
НА ИСТОРИЧЕСКУЮ СРЕДУ  
В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РЕГЕНЕРАЦИИ*

*Н.Н. Кудряшов*

*Николай Николаевич Кудряшов  
E-mail: knnaid@mail.ru*

*Кафедра архитектуры, Ярославский государственный технический  
университет, ул. Володарского, 103, Ярославль, Российская  
Федерация, 150040*



*В статье рассматриваются проектно-методические аспекты нейтрализации воздействия нового строительства на целостность исторической среды в условиях ее реконструкции-регенерации. На основе базисных принципов контекстуализма как позитивного творческого кредо в режиме признания доминирующей ценности исторической среды в целом анализируются творческие средства адхократического подхода в современной архитектурной практике. Приводится оригинальная классификация объектов нового строительства в жанре «ad hoc», которые объединяет общий метод девизуализации. Метод девизуализации в техническом аспекте основан на применении современных высокотехнологичных строительных материалов – светопрозрачных и светоотражающих одновременно планарах, по физической структуре являющихся композитными материалами. Определяются проектно-методические условия и ограничения в применении таких ограждающих-фасадных материалов. В качестве основного вывода статьи утверждается, что развитие высоких технологий в современной архитектуре с применением «умных композитов» позволит эффективно реализовать метод девизуализации нового строительства в условиях регенерации исторической среды. Таким образом решается проблема единства «старого» и «нового» в практике градостроительства, в частности – практике реконструкции городов.*

**Ключевые слова:** историческая среда, регенерация, контекстуализм нового строительства, адхократия, девизуализация, планарное остекление, архитип

**Для цитирования:**

Кудряшов Н.Н. Девизуализация как метод нейтрализации воздействия нового строительства на историческую среду в процессе ее регенерации. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 81-88 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2020\_1\_81



*UDC 05.23.21*

*DEVISUALIZATION AS A METHOD  
OF NEUTRALIZING THE IMPACT  
OF NEW CONSTRUCTION  
ON THE HISTORICAL ENVIRONMENT  
DURING ITS REGENERATION*

*N.N. Kudryashov*

*Nikolay Nikolaevich Kudryashov  
E-mail: knnaid@mail.ru*

*Department of Architecture, Yaroslavl State Technical University, 103,  
Volodarsky st., Yaroslavl, Russia, 150040*



*The paper deals with the design and methodology of neutralizing the impact of new construction on the integrity of the historic environment under its reconstruction - regeneration. Creative adhoc methods are analyzed in contemporary architectural practice by applying the basic principles of contextualism as a positive creative credo recognizing the dominant value of the historical environment. The paper provides an original classification of new construction objects in the "ad hoc" genre. They come together by a common method of devisualization. Technically, this method is based on using modern high-tech building materials – translucent and light-reflective planars, which are composites by the physical structure. We define the design conditions and limitations to using these façade-enveloping materials. In conclusion, it is argued that the development of high technology in modern architecture with the use of "smart composites" can pave a way to effectively implement the method of new construction withing the re-generation of the historic environment. Thus, the problem of harmony of "old" and "new" in urban planning – the urban renewal specifically – is solved.*

**Key words:** *historical environment, regeneration, contextualism in new construction, adhocacy, devisualization, planar glazing, architecture*

**For citation:**

*Kudryashov N.N. Devisualization as a method of neutralizing the impact of new construction on the historical environment during its regeneration. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 81-88 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)*

**DOI:** *10.52957/27821919\_2020\_1\_81*



## ВВЕДЕНИЕ

В работе предлагается несколько методических рекомендаций по нейтрализации воздействия нового строительства на объекты архитектурно-градостроительного наследия в исторической среде. Методические рекомендации объединены под термином «девизуализация», обозначающим метод реконструкции-регенерации исторической среды, выявленный как на основе методологических исследований, так и на основе архитектурно-строительной практики.

Процесс регенерации исторической среды объективно предполагает двуединство ее (исторической среды) сохранения и развития. Дуализм сохранения и развития или возрождения и развития утверждается практикой контекстуализма на основе соединения принципов и методов адхократии и урбанизма. Биполярность процесса регенерации под девизом «сохраняя - развивать» или «развивая - сохранять» является концептуальной базой широко распространенной архитектурной практики, достойной внимательного изучения и глубокого методического анализа.

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Регенерация исторической среды предполагает, в первую очередь, компенсационное строительство взамен утраченных элементов исторической градостроительной композиции в условиях признания доминирующей ценности исторической среды и в целом подчиняется правилу контекстуализма: *ad hoc + urbanism*.

Адхократический подход к процессу регенерации исторической среды (*ad hoc*) реализуется в практике современной архитектуры средствами:

- неовернакуляра как формалистического воспроизведения композиционных свойств исторической застройки, часто в абстрактном, опосредованном виде;
- архитектурного палимпсеста – наслаивания старого и нового, как способа раскрыть, экспонировать историю места – «говорящая» архитектура со стремлением, выразить, сущность «*genius loci*» («духа места»);
- тематического единства градокомпозиции как средства выявления и усиления, нередко, возрождения «духа места», сохранения и возвращения исторической памяти места;
- художественного контраста старого и нового как дуализма детали и фона, конкретного и абстрактного, порядка и хаоса.

Все рассмотренные средства или методические принципы формирования новой застройки в существующем градостроительном контексте регенерации (возрождения и развития) исторической среды утверждают приоритет локального над «беспочвенным», значимость коренной, концептуальной связи современной архитектуры с местом ее создания, со сложившейся (или утраченной) драматургией пространства.

Данные методические принципы и средства отрицают формально поверхностный постмодернистский историзм

с его стилизацией, цитированием и фальсификацией истории. Старое должно оставаться старым, а новое – быть новым, чтобы не фальсифицировать историю.

При этом в процессе регенерации любая новая постройка трансформирует место и среду в целом. Эта трансформация зачастую может обезличить историческую среду, подчинить старое новому, уничтожить дух места, создав диссонанс, разорвать контекст как ткань исторической градостроительной композиции. Существование устойчивого мнения, а по сути, мифа о несовместимости двух основ регенерации исторической среды – старого и нового – поддерживается негативным опытом появления локальных диссонансов, сознательно создаваемых архитекторами – противниками адхократии (*ad hoc*). Запрет на применение современных – новых архитектурных средств, в том числе современных строительных материалов, включая «умные» композиты, зафиксирован во множестве регламентов проектов зон охраны историко-культурного наследия и достопримечательных мест. Этот запрет является реакцией на столь же многочисленные нарушения, чаще – игнорирование методических основ, принципов и правил регенерации исторической среды. В то же время богатый и успешный практический опыт реконструкции исторической среды старых европейских городов свидетельствует о том, что современные ограждающие строительные материалы и конструкции, в частности, композиты, обладающие, в силу своей энтропической природы, уникальной пластичностью и нейтральной безликой фактурой, являются универсальным материалом для решения задачи девизуализации и дематериализации нового строительства в исторической среде.

## АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНОЙ ПРАКТИКИ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

По результатам анализа архитектурной практики в исторической среде можно выделить четыре основных адхократических архитипа нового строительства: здание-«кулиса», здание-«хамелеон», здание-«призрак» и здание-«зеркало».

Здание-«кулиса» чаще всего воплощает адхократический метод архитектурного палимпсеста. Кулиса рассматривается как удачное решение проблемы детали и фона, формируя контраст без конфликта старого и нового. Кулиса создаёт нейтральный фон – фоновую ткань, на которую «нашиваются» драгоценные фрагменты былого, несущие ауру места, дух места (*genius loci*). Единство детали (старого) и фона (нового) самым ярким образом воплощено в музее Кельнского диоцеза «Колумба» («*Kolumba*» *Diocesan Museum*, arch. Peter Zumthor, 2007). Архитектурный объект трактуется как бриколлаж пластов, сплав следов, фрагментов и элементов исторической среды.

Здания-«хамелеоны» в буквальном смысле растворяются в окружающей среде, сливаясь с контекстом, имитируют фрагменты природных или градостроительных ландшафтов, то самое место – *ad hoc*, используя средства архитектурного камуфляжа или мимикрии и театрально-сценические приемы декорирования, известные со времён эпохи рококо, а в наши дни – суперграфические принты, слайд-фасады, скрываясь за *data*-планами.



Наибольшее, даже массовое, распространение в современной архитектурной практике получили два архитипа: здание-«призрак» и здание-«зеркало». Оба архитипа используют в качестве ограждающего фасадного материала стекло как собирательный обобщающий термин, а по своей сути – сложный, «умный» - высокотехнологичный композитный материал с полярными, диаметрально противоположными свойствами, а именно: полным светоотражением зеркальных поверхностей фасадов (здание-«зеркало») или максимальным светопропусканием с эффектом прозрачности (здание-«призрак») (рис. 1). Оба архитипа воплощают один из принципов психологии восприятия на основе GESTALT-философии: «отсутствие присутствия» или «присутствие отсутствия». Здание-«призрак» создает эффект растворения в пространстве контекста и служит в качестве заполнения паузы в тексте градостроительной ткани. Этот архитип чаще возникает в условиях разреженной, с лакунами, застройки и низкой плотности историко-культурной среды с относительно малой эстетической массой, которая определяется по формуле  $M = O/C$ . Здесь  $M$  – эстетическая масса,  $O$  – фактор порядка,  $C$  – фактор сложности (З.Н. Яргина, Эстетика города).



Рис. 1. LVR – Landes Museum Bonn. Architektur gruppe Stuttgart. 2003.

Фото: Jorgens.mi. Пример архитипа здание-«призрак» с двухслойным фасадом – планарным футляром

Fig. 1. LVR – Landes Museum Bonn. Architektur gruppe Stuttgart. 2003.

Photo: Jorgens.mi. An example of a building-ghost architecture with a two-layer facade - a planar case

Реконструкция-расширение земельного исторического музея в Бонне, Германия. Неоконструктивистское здание в «фирменной» эстетике строго пуризма в своей простоте и супрематичности «вне места и вне времени» должно было нести идею антиисторичности и универсальности. Денди-пуризм здания музея является нейтральным фоном, безликим футляром для хранения и экспозиции древнего сокровища во внутреннем пространстве и столь же безобразным, «тающим» в городской среде пространства внешнего. Игнорируя само понятие «места» и, тем более, «духа места», это здание «молчит», не мешая монологу исторической среды.

Архитектурная практика «призраков» опирается на опыт денди-пуризма Миса Ван Дер Роэ и ярко проявилась в неомодернистском творчестве Жана Нувеля и Одиль Декк

(рис. 2). В числе композиционных приемов современных мастеров этого жанра можно определить:

- слоистость светопрозрачных фасадов, состоящих из двух-трех кулис по типу многочисленной драпировки;
- нечеткий - размытый - рваный контур, открытый на контекст;
- плоскостные и гладкие фасады с минимальным количеством граней;
- минималистичность (простота и лапидарность) формы «аквариума».



Рис. 2. MACRO – Музей современного искусства в Риме. Арх. Одиль Декк (Odile Decq). 2002.

Фото: Massimiliano Tonelli. Пример сочетания двух архитипов: здание-«кулиса» и здание-«призрак» в двуединстве со старыми стенами архитектурного палимпсеста

Fig. 2. MACRO – Museum of Contemporary Art in Rome. Arkh. Odile Decq. 2002.

Photo: Massimiliano Tonelli. An example of a combination of two architectes: «building – backstage» and «building – ghost» in double unity with the old walls of the architectural palimpsest

MACRO Римский музей современного искусства, арх. Одиль Декк (Одиль Декк), (объект № 91, 1990 г.) в стенах Урбана VII у Ворота Пия (Porta Pia). Музей MACRO занимает значительную часть исторического квартала после его реконструкции – санации лакуны, возникшей на месте старой пивоварни «Перони». Конверсионный процесс реконструкции - регенерации исторической среды по проекту арх. Одиль Декк, после структурной реорганизации квартала позволил создать культурный центр мирового уровня общей площадью более 12000 м<sup>2</sup>.

MACRO соединяет в своей композиции два архитипа: здание-«кулиса» и здание-«призрак», в полной мере воплощая метод девизуализации нового как безликого (невидимка-призрак) фона в двуединстве архитектурного палимпсеста со старыми стенами.

Здание-«зеркало» максимально корректно отвечает принципам регенерации в условиях плотной и сверхплотной - стесненной застройки, с плотной историко-культурной средой, обладающей большой эстетической массой, которая определяется по формуле  $M = C/O$ . Здесь  $M$  – эстетическая масса,  $C$  – фактор сложности,  $O$  – фактор порядка (З.Н. Яргина. Эстетика города).

Зеркальные фасады, обращенные на кульминационные фрагменты исторической среды, в отражениях раскрывая и умножая их эстетическую ценность, усиливая их домини-



рующее значение, и формируют образы исторической среды в новых ракурсах (рис. 3).



Рис. 3. Расширение исторического музея. Берн, Швейцария. Арх. «:mlzd».ch (mit Liebezum Detail). 2009. Willys Fotowerkstatt. Пример архитектуры здание-«зеркало»

Fig. 3. Expansion of the historical museum. Bern, Switzerland. Arkh. «:mlzd».ch (mit Liebezum Detail). 2009. Willys Fotowerkstatt. Example of a building-mirror architecture

Как и здания-«призраки», «зеркала» являются развитием денди-пуристской традиции и обычно воспринимаются в качестве арт-объектов, порталов, открывающих путь в прошлое (рис. 4).



Рис. 4. Glascubus («Стеклянный куб»). Aachen. Арх. Marcus Vonhoegen. 1998.

Фото: Thomas Robbin. Пример архитектуры здание-«зеркало»  
Fig. 4. Glascubus ("Glass Cube"). Aachen. Arkh. Marcus Vonhoegen. 1998.

Photo: Thomas Robbin. Example of a building-mirror architecture

Однако никакой материал не решает проблему совместности старого и нового автоматически. Успешное решение адхократического подхода в процессе регенерации исторической среды возможно при выполнении универсального принципа: соблюдения трёх основных параметров исторической среды: масштаба (MS), модуля (MD), и ритма (R) застройки по формуле "минимаксов" – строгих неравенств: не больше большего и не меньше меньшего из соответствующих параметров исторической среды (MS, MD, R). В качестве примера из авторской практики применения современных высокотехнологичных строительных материалов можно привести проект регенерации исторического квартала № 2 (рис. 5), расположенного на территории объекта Всемирного наследия – достопримеча-

тельного места «Исторический центр города Ярославля».



Рис. 5. Фрагмент эскизного проекта регенерации исторического квартала № 2

в Ярославле. Территория объекта Всемирного наследия «Исторический центр города Ярославля». Арх. Н.Н. Кудряшов, М.Н. Кудряшов. 2017.

Пример сочетания архитектурных зданий-«кулисы» и здания-«хамелеон» по методу архитектурного палимпсеста  
Fig. 5. Fragment of the preliminary project of regeneration of the historical quarter N 2 in Yaroslavl. Territory of the World Heritage Site «Historical Center of Yaroslavl».

Arkh. N.N. Kudryashov, M.N. Kudryashov. 2017. Example of a combination of architects building- «backstage» and building-«chameleon» according to the method of architectural palimpsest

Регенерация исторической среды основана на возрождении образа старинной усадьбы, утопающей в саду. Образ усадьбы в саду воссоздается на сочетании архитектурных «кулисы» и «хамелеона». Двухслойные стеклянные планары новых построек имитируют образ старого сада-хамелеона, окружающего в качестве фона-кулисы отреставрированные усадебные фасады, создавая двуединство архитектурного палимпсеста.

## ВЫВОДЫ

Выполнение принципов контекстуализма и метода девизуализации нового строительства в этом проекте позволяет изменить регламенты достопримечательного места на определенной территории:

Приложение к приказу Министерства культуры РФ от 11 января 2016 г. № 14: «... При осуществлении регенерации историко-градостроительной среды в целях сохранения или выявления ее основных градостроительных и композиционных характеристик, допускается фрагментарное применение современных материалов (планарное остекление) для нейтрализации негативного влияния новых объектов на зоны прямого визуального контакта с объектами культурного наследия».

Развитие высоких технологий в современной архитектуре не в формально-стилистическом и поверхностно-декоративном смысле, а в их истинном значении с применением, в том числе «умных компонентов», дает возможность эффективно реализовать метод девизуализации





нового строительства в условиях регенерации исторической среды.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Конвенция об охране Всемирного культурного и природного наследия (ЮНЕСКО, 1972 г.). ООН; 2019. URL: [www.un.org](http://www.un.org), [www.unesco.org](http://www.unesco.org)
2. World Heritage List. UNESCO; 2019. URL: [ww.unesco.org](http://ww.unesco.org)
3. **Яргина З.Н.** Эстетика города. М.: Стройиздат, 1991.
4. **Яргина З.Н.** Градостроительный анализ. М.: Стройиздат. 1984. С. 244.
5. **Шевченко Э.А.** О проблемах сохранения исторических поселений и не только... СПб: ЗАО Издательство «Зодчий». 2018. С. 367.
6. Исторические центры городов России. Опыт российско-германского сотрудничества в решении задач реконструкции и развития исторических городов и районов. Министерство городского развития, культуры и спорта земли Северный Рейн-Вестфалия (МГРиТ), Министерство строительства российской Федерации (МИНСТРОЙ). Дортмунд: ISL. 1996. Вып. 110. С. 169. *Historische Stadtkerne in Rußland. Erfahrungen der russisch – deutschen Zusammenarbeit bei der Lösung von Aufgaben im Bereich Rekonstruktion und Entwicklung von historischen Altstaden und Altstadtteilen. Ministerium für Stadtentwicklung, Kultur und Sport des Landes Nordrhein-Westfalen (MSKS), Ministerium für Bauwesen der Russischen Foderation (MINSTROJ) – Dortmund: Institut für Landes – und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen, ISL. 1996. V. 110. P. 169.*
7. **Schempp D., Krampen M.** Glass Architects/Glasarchitekten. Concepts, Buildings, Perspectives. Konzepte, Bauten, Perspektive, Avedition. Verlagfür Architektur. 2000. С. 240.
8. **Campagno A.** Intelligent Glass Facades. Material, Practice, Design. Birkhäuser Verlag. 2002. P. 160.
9. **Pottgiesser U.** Fassad enschichtungen-Glas. Mehrschalige Glaskonstruktionen. Bauwerk Verlag, 2003. P. 208.

Поступила в редакцию 11.09.2020

Принята к опубликованию 15.10.2020

### REFERENCES

1. Convention on the protection of the world cultural and natural heritage (UNESCO, 1972). UN; 2019. URL: [www.un.org](http://www.un.org), [www.unesco.org](http://www.unesco.org) (in Russian).
2. World Heritage List. UNESCO; 2019. URL: [ww.unesco.org](http://ww.unesco.org)
3. **Yargina Z.N.** Aesthetics of the city. M.: Stroyizdat, 1991. (in Russian).
4. **Yargina Z.N.** Urban planning analysis. M.: Stroyizdat. 1984. P. 244. (in Russian).
5. **Shevchenko E.A.** About problems of preserving historical settlements and not only... Saint Petersburg: ZAO publishing house «Zodchij». 2018. P. 367. (in Russian).
6. *Historische Stadtkerne in Rußland. Erfahrungen der russisch – deutschen Zusammenarbeit bei der Lösung von Aufgaben im Bereich Rekonstruktion und Entwicklung von historischen Altstaden und Altstadtteilen. Ministerium für Stadtentwicklung, Kultur und Sport des Landes Nordrhein-Westfalen*

(MSKS), Ministerium für Bauwesen der Russischen Foderation (MINSTROJ) – Dortmund: Institut für Landes – und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen, ISL. 1996. V. 110. P. 169.

7. **Schempp D., Krampen M.** Glass Architects/Glasarchitekten. Concepts, Buildings, Perspectives. Konzepte, Bauten, Perspektive, Avedition. Verlagfür Architektur. 2000. С. 240.
8. **Campagno A.** Intelligent Glass Facades. Material, Practice, Design. Birkhäuser Verlag. 2002. P. 160.
9. **Pottgiesser U.** Fassad enschichtungen-Glas. Mehrschalige Glaskonstruktionen. Bauwerk Verlag, 2003. P. 208.

Received 11.09.2020

Accepted 15.10.2020



## ABSTRACTS

**P.B. RAZGOVOROV, A.A. IGNATYEV, M.A. ABRAMOV, R.S. NAGORNOV**  
**PROCESSING OF RAW ALUMINOSILICATES AND SUBWAY CONSTRUCTION**  
**DUMPS INTO COMPOSITE SORBENTS FOR PURIFICATION OF WATER AND OIL-**  
**CONTAINING MEDIA**

**Key words:** natural aluminosilicate raw materials, underground construction dumps, modification, composite sorbents, montmorillonite, kaolinite, water and oil-containing media

*The study establishes that natural raw aluminosilicate and dumps from Moscow subway construction can be used as composite sorbents for treatment of oil containing media after calcination to 350-400 °C and further modification. To do this, we have analyzed the works of Russian and foreign scientists and authors' experimental studies of physical and chemical properties of these materials. The activity of materials is determined by particle size, porosity, and pore volume distribution, as well as concentration of additional Lewis and Bronsted centers on the surface as a result of acid-alkali treatment. These centers can be used to sorb impurities in aqueous and oily media depending on the polarity of the adsorbate molecules. The study revealed promising directions of research into obtaining composite sorbents by treating raw aluminosilicate raw materials and construction clay waste mechanically and chemically as well as using composites with activated charcoal. The study also elaborates on using extruded composites to simplify technological cycle of purification of oil-containing media. It shows that the regenerating ability of the obtained sorbents is determined in many respects by the alkaline agents present in them. It also includes a list of physical-chemical methods for complex research of media purification quality after contact and subsequent separation of the phases by filtration.*

**T.A. NIZINA, V.P. SELYAEV, D.R. NIZIN, N.S. KANAeva, D.A. ARTAMONOV**  
**KINETICS OF DAMAGE ACCUMULATION IN THE STRUCTURE OF EPOXY**  
**POLYMERS EXPOSED IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE**

**Key words:** epoxy polymers, strain curves, damage accumulation, fractal analysis, minimum coverage method

*The study deals with the kinetics of damage accumulation during exposure in a temperate climate. The research uses two types of polymer composites of significantly different climatic resistance as an example. The proposed method is the analysis of changes in the fractality index determined by the least-coverage method by tensile strain curves recorded with a high reading frequency (0.01 sec.). The fractality indices were calculated by analyzing the preceding time section that corresponds to 16 (24) experimental points, i.e., 0.16 sec. The levels of "critical" states corresponded to the minimum values of fractality indices ranged for the studied deformation curves from the beginning of loading to the level of reaching maximum tensile stresses by the specimens. The study included a field experiment on climatic aging of the studied polymers for one calendar year. We have recorded the changes in the elastic-strength characteristics of the samples after 45, 90, 180, 270 and 360 days.*

*The results of the study showed significant differences in the damage accumulation kinetics of epoxy polymers impacted by tensile stresses, including those depending on the type of epoxy resin and hardener, as well as the duration of full-scale exposure. It was found*



that for climatically unstable compositions after just 180 days of climatic there is a grouping of "critical" points into ensembles similar in time, stress level, and relative elongation after stretching. At the same time, the climatic resistant polymers have a more uniform distribution of "critical" points along the deformation curves, which obviously allows them to successfully redistribute the occurring overstresses onto the workable structural elements and, consequently, to accept significantly higher levels of tensile loads and relative deformations.

**A.L. BALUSHKIN**

**ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE FLOORS WITH REGARD TO ADAPTATION TO SPECIAL EFFECTS**

**Key words:** special effects, progressive collapse, super-critical stages of deformation, transformation of the design scheme

The paper discusses the features of the calculation of reinforced concrete bar structures during possible emergencies. A modified deformation model is used to calculate the bearing capacity of a bendable reinforced concrete element. Specific calculations can be performed at different levels: an element cross-section, an individual element, a structural system.

**A.A. IGNATYEV, V.M. GOTOVTSSEV**

**TRANSFORMATION OF A DISTURBED SITTING DROP**

**Key words:** sitting drop, interphase layer, wetting angle

The paper presents the results of a study of equilibrium of a sitting drop from the standpoint of continuum mechanics. It is shown that the connection between internal forces and interfacial tensions is formed by gradients of internal pressures of a medium in interface layers that lead to forming body forces. It was found that the shape of a sitting drop with the contact angle equal  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  is the minimum surface energy state, in which the liquid - solid interface layer is not formed, and the surface energy of the drop takes the minimum value. It was also determined that the thickness of the interface layer varies depending on the values of the contact angle and reaches a maximum value at the complete wetting and complete non-wetting. Finally, the paper examines the impact of external and internal disturbances on the shape of a sitting drop.

**S.V. FEDOSOV, V.E. RUMYANTSEVA, S.A. LOGINOVA**  
**BIODEGRADATION OF HYDROTECHNICAL CONCRETE**

**Key words:** concrete, biocorrosion, biodestructors, microorganisms, mathematic simulation, mass transfer

It is increasingly important to solve problems of increasing resistance of concrete to biologically aggressive media, since the species diversity of biodestructors is growing steadily. To develop new effective methods of concrete bioprotection, it is necessary to conduct complex research of corrosion processes in biologically aggressive media. The paper presents a modern view on mechanisms of concrete destruction as a result of corrosion. The study determined the dependence of biological damage on the physical and mechanical properties of concrete, on the aggressiveness of biodegraders, as well as a number of factors accompanying this interaction. Cement concrete samples subjected to biofouling were used as objects of study. The study includes the main provisions which can be used to formulate the mathematical theory of biological corrosion. Finally, the study substantiates the condition of



*generality of the methodological approach to the modeling of mass transfer processes at bi-corrosion and liquid corrosion of building materials.*

**M.Y. TARSHIS, L.V. KOROLEV, S.N. CHERPITSKY, A.B. KAPRANOVA**  
**QUALITY CONTROL SYSTEM FOR BULK MIX IN A CONTINUOUS DRUM DEVICE**

**Key words:** quality control, bulk mixture, uniformity, evaluation method, integral criterion, informativeness

*Within the course of study, we have developed the system of quality control of bulk mix blended in a continuously operating device. The controlled parameter is the homogeneity criterion of the mixture which is used to assess its quality. The control method is based on the method of determining the properties of the bulk mixture by the distribution of particles of the processed components in the cross section, which is fixed when passing through a transparent partition at the device outlet. The effectiveness of the methodology is ensured by using a non-contact method of assessing the homogeneity of bulk contents. This method eliminates the distortion of the spatial distribution of particles in combination with the integral criterion for assessing the homogeneity of the mixture, which is highly informative.*

**V.YU. VERBIN, V.M. DUDIN**  
**SELECTION OF TECHNOLOGY FOR HIGHWAY ROAD SURFACE OVERHAUL**

**Key words:** road surface, overhaul, cold in-place recycling, strength calculations, feasibility comparison

*In the construction and overhaul of roads, the complex-mechanized method is widely used. It is based on modern technologies, machines, and mechanisms. It leads to the maximum productivity, minimum cost, and optimal terms of work. There are many approaches to choosing technologies for construction. One of them is the technical and economic comparison of different technologies, which helps to consider many factors affecting the construction process in the most complete way. The proposed paper considers the use of such an approach to the choice of technology for the overhaul of road surface. Cold in-place recycling technology is offered as an innovation. Based on the calculations done during the comparison of different technologies for a particular road section, the paper provides the list of recommended actions prior to the selection of a particular technology.*

**A.V. ZAKHAROV, N.A. ISAEVA, M.YU. POKROVSKAYA**  
**SPATIAL ORGANIZATION PROBLEMS (PUSHKIN SQUARE, IVANOVO)**

**Key words:** square formation, morphology, visual state of space, dissonance, architectural style of public spaces

*The paper studies the problem of studying the morphology of public space based on one of the main squares of Ivanovo, Russia. It considers the influence of different factors (site landscape, transport communications, socio-cultural and temporal factors) on the shaping of urban areas. The study includes the analysis of specific aspects of spatial organization at different stages of its formation. The paper defines the role of public buildings, their influence on the building up the artistic image, ensemble, and architectural stylistics of a public space.*

*We have analyzed the architecture of the erected structures and their mutual influence on each other as well as on the geometry of the space. The study draws attention to the problem of inter-action of the old and the new, their coexistence in the structure of the*



*square. We have identified the directions for the development of space in the historic city center. The paper highlights the visual perception of the square's space, the influence of high-rise development on the scale of the square and its visual comfort. The tall buildings either complement the visual panoramas of the space or clash with the existing square.*

*The study considers the methods of leveling errors of urban development in the formation of squares. Two ways to fix it are proposed — modern technologies of glazing the surfaces of buildings and graphic design (graffiti).*

**N.N. KUDRYASHOV**

**DEVISUALIZATION AS A METHOD OF NEUTRALIZING THE IMPACT OF NEW  
CONSTRUCTION ON THE HISTORICAL ENVIRONMENT DURING ITS  
REGENERATION**

**Key words:** historical environment, regeneration, contextualism in new construction, adhoc, devisualization, planar glazing, architecture

*The paper deals with the design and methodology of neutralizing the impact of new construction on the integrity of the historic environment under its reconstruction - regeneration. Creative adhoc methods are analyzed in contemporary architectural practice by applying the basic principles of contextualism as a positive creative credo recognizing the dominant value of the historical environment. The paper provides an original classification of new construction objects in the "ad hoc" genre. They come together by a common method of devisualization. Technically, this method is based on using modern high-tech building materials — translucent and light-reflective planars, which are composites by the physical structure. We define the design conditions and limitations to using these façade-enveloping materials. In conclusion, it is argued that the development of high technology in modern architecture with the use of "smart composites" can pave a way to effectively implement the method of new construction withing the re-generation of the historic environment. Thus, the problem of harmony of "old" and "new" in urban planning — the urban renewal specifically — is solved.*



## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

Правовую основу обеспечения публикационной этики составляют международные стандарты: положения II Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований, положения Комитета по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics - COPE) и нормы раздела «Авторское право» Гражданского кодекса РФ.

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

- работа не была опубликована ранее в другом журнале;
- не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие (в явной или неявной форме) организации, в которой было проведено исследование.

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям таблиц, Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат.

### **Авторские права**

Авторы, направляющие свои работы в журнал, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договорённости, касающиеся не-эксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.

### **Приватность**

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных журналом; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

## ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

В журнале «Умные композиты в строительстве» / «Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН, других исследовательских подразделений, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры, в том числе в странах стран СНГ и за рубежом.



## Рубрики журнала

- 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения
- 05.23.05 Строительные материалы и изделия
- 05.23.11 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов
- 05.23.19 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства
- 05.23.21 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

**Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:**

1. Работа должна соответствовать профилю журнала, обладать актуальностью, новизной, иметь прикладное значение (и/или теоретическое обоснование). Вопрос об опубликовании статьи, ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, и ее решение является окончательным.

2. Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение полученных автором результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

3. Все представленные статьи должны быть подготовлены 12 кеглем, шрифт *Times New Roman*, интервал 1.1. Поля: верхнее и нижнее – 3 см, левое и правое – 2.5 см. Абзацный отступ – 0,75 см. Объем статьи – 6-15 страниц, включая список литературы, таблицы (не более 3, ширина 8 см) и рисунки (не более 5, для обзорной статьи – не более 8, ширина 8 см), в том числе помеченные буквами *a*, *b* и т.д. Рисунки оформляются без рамок и размещаются, как и подписи к ним, таблицы и заголовки к ним, примечания, строго по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 25 до 30 страниц.

4. При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. При первом упоминании сокращенного термина обязательно приводится его расшифровка в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются елочкой. Текст набирается без нумерации страниц.

## Структура статьи

На первой странице рукописи слева проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК, шрифт 10 пт, прямой, *Verdana*, без отступа. После УДК пропускается строка, дается наименование работы по центру (шрифт 12 пт, прямой, полужирный, все буквы прописные, шрифт *Verdana*). Ниже по центру – инициалы, фамилия авторов (шрифт 11 пт, курсив, *Verdana*, полужирный). После фамилий авторов указываются их место работы: подразделение и название организации, почтовый адрес (шрифт 10 пт, курсив, *Verdana*). Отдельной строкой указывается электронный адрес авторов (курсив). Далее через интервал (1 строка) размещается аннотация (150-200 слов, выравнивание по ширине, размер шрифта 10 пт, курсив, отступ слева 0.75 см, шрифт *Times New Roman*). После аннотации и интервала (1 строка) полужирным шрифтом курсивом набирается *Ключевые слова* и приводят шриф-



том *Times New Roman* размером 10 пт 5-8 словосочетаний (не курсив), без точки в конце.

Затем следует текст статьи, в котором через интервал выделяются разделы: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы (в обзорной статье выделяются Введение, названия подразделов курсивом, Выводы). Статья заканчивается разделом Литература. Оптимальное количество цитированных источников от 15 до 20, желательно включить не менее 3 работ, входящих в базы WoS/Scopus. В обзорных работах принимаются ссылки на 50-80 источников. Под списком литературных источников через интервал слева курсивом приводятся слова: *Поступила в редакцию*, на следующей строке: *Принята к опубликованию*.

5. В адрес редакции, кроме электронного варианта, направляют 1 экземпляр статьи в распечатанном виде с подписями всех авторов после слов *Принята к опубликованию*.

### Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе Microsoft Word в форматах .doc или .docx. Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

### Оформление литературных ссылок

Все русскоязычные литературные источники должны быть указаны на английском языке. Издания, которые не переводятся, необходимо указать транслитерацией в соответствии с общепринятыми международными правилами, в конце каждого такого источника должна стоять пометка (in Russian) (см. <http://www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html>).

Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала, год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при наличии), например, DOI: 10.6060/2012.01.01.

#### Ссылки на статьи из иностранных источников:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** Название статьи (англ.). *Название журнала (англ.)*. Год. Том (V). Номер (N). Диапазон страниц (например, P. 465-472). DOI (например, DOI: 10.13655/1.6.1234567).

#### Ссылки на статьи на русском языке [перевод на английский]:

**1 Фамилия И.О., 2 Фамилия И.О.** Название статьи. *Название журнала*. Год. Том. Номер. Диапазон страниц. [1 Familia I.O., 2 Familia I.O. Перевод названия статьи. *Официальное название на английском языке/Транслитерация названия журнала*. Год. Том (V). Номер (N). Диапазон страниц, например: P. 17-23 (in Russian)].

#### Ссылки на монографии на иностранном языке:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** *Название книги (англ.)*. Номер переиздания. Город (англ.): Издательство (англ.). Год. Общее число страниц (например: 372 p.)

#### Ссылки на монографии на русском языке [перевод на английский]:





1 Фамилия И.О., 2 Фамилия И.О. *Название монографии*. Город: Издательство. Год. Общее число страниц (например: 456 с.) [1 Familia I.O., 2 Familia I.O. *Перевод названия монографии на англ. язык*. Gorod: Izdatelstvo. God. 456 p. (in Russian)].

#### Ссылки на интернет-ресурсы:

Название материала на сайте [сайт]. Название сайта; 2016 [обновлено 19 октября 2016; процитировано 30 октября 2016]. Доступно: <http://www.example.ru>

#### Примеры оформления ссылок на литературные источники

##### Литература

1. **Prokof'ev V.Yu., Razgovorov P.B., Gordina N.E.** The adsorption of undesirable impurities from sunflower oil the granulated sorbents based on caolin clay. *Int. J. Food Eng.* 2014. V. 10. N 4. P. 713-720.

2. **Разговоров П.Б., Ситанов С.В., Козлов В.А.** Изучение взаимодействия некоторых затравочных материалов и сложноэфирной составляющей воскоподобных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2002. Т. 45. Вып. 1. С. 34-37.

3. **Разговоров П.Б., Ситанов С.В.** Экспресс-анализ восков в растительных маслах. *Масложир. пром-сть*. 2009. № 3. С. 21-23.

4. **Разговоров П.Б., Горшков В.К.** Технологическое оборудование отрасли: расчеты в масложировых производствах: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2009. 48 с.

##### REFERENCES

1. **Prokof'ev V.Yu., Razgovorov P.B., Gordina N.E.** The adsorption of undesirable impurities from sunflower oil the granulated sorbents based on caolin clay. *Int. J. Food Eng.* 2014. V. 10. N 4. P. 713-720.

2. **Razgovorov P. B., Sitanov S.V., Kozlov V.A.** Investigation of interaction of some priming (fuse) materials and ester component of wax-like compounds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2002. V. 45. N 1. P. 34-37 (in Russian).

3. **Razgovorov P.B., Sitanov S.V.** Express analysis of waxes in vegetable oils. *Maslozhir. promyshl.* 2009. N 3. P. 21-23 (in Russian).

4. **Razgovorov P.B., Gorshkov V.K.** Processing equipment of industry: calculations in oil and fat productions: tutorial. Ivanovo: ISUCT. 2009. 48 p. (in Russian).