

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 2
выпуск**

**3
2021**

**VOL. 2
ISSUE 3**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Том 2

Вып. 3

Ярославль 2021

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 (иностраннный 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), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИС (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	ignatyevaa@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 2

Issue 3

Yaroslavl 2021

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

EDITORIAL BOARD

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

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), S.P. RUDOBASHTA (d.en.s., prof., Moscow), 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)

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Балушкин А.Л.</i> Железобетонные конструкции с различными способами фиксации арматурных элементов	7
<i>Овчинников А.А., Обручев Д.В., Данилов И.Н.</i> Композиционные материалы на основе полиструктурной интеграции гетерогенных материалов.....	21
<i>Блазнов А.Н., Маркин В.Б., Савин В.Ф., Фирсов В.В., Генина А.А., Сакошев Е.Г.</i> Метод исследования долговечности стеклопластиковой строительной арматуры	32
<i>Рудобашта С.П.</i> Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов	46
<i>Дудин В.М., Смекалов Н.С., Окутин А.Э.</i> Применение сапропеля оз. Неро Ярославской Области для производства асфальтобетонных смесей.....	57
<i>Проваторова Г.В.</i> Применение наномодификаторов для повышения качества дорожных битумов.	68
<i>Сапрыкина Н.С.</i> Поселок завода синтетического каучука в Ярославле –авангардный тип советского градостроительного образования	77
<i>Личак Н.А.</i> Реализация концепций конструктивизма на примере жизни Иваново- Вознесенска 1920-1930-х годов.	88



CONTENTS

<i>Balushkin A.L.</i> Reinforced concrete constructions with different methods of armouring fixing. Smart Composite in Construction.....	7
<i>Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Danilov I.N.</i> Composite materials based on polysturctural integration of heterogeneous materials.....	21
<i>Blaznov A.N., Markin V.B., Savin V.F., Firsov V.V., Genina A.A., Sakoshev E.G.</i> , The method of studying the durability of fiberglass construction reinforcement.....	32
<i>Rudobashta S.P.</i> Mathematical modeling of processes electromagnetic heating of building materials.....	46
<i>Dudin V.M., Smekalov N.S., Okutin A.E.</i> Application of spropel from lake Nero, Yaroslavl region, Russia for production of road concrete mixtures.....	57
<i>Provatorova G.V.</i> Nanomodifiers in producing higher quality paving asphalt	68
<i>Saprykina N.S.</i> Settlement of Synthetic Rubber Plant in Yaroslavl –avant-garde type of Soviet urban development.	77
<i>Lichak N.A.</i> The implementation of constructivism concepts in Ivanovo-Voznesensk in the 1920s-1930s.....	88



УДК 624.072

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ФИКСАЦИИ АРМАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.Л. Балушкин

Александр Леонидович Балушкин

Кафедра строительных конструкций, Ярославский государственный технический университет, ул.
Кривова, 40, Ярославль, Российская Федерация, 150048

E-mail: balushkinal@ystu.ru



Рассматриваются различные типы элементов железобетонных перекрытий, реализованные в практике строительства и имеющие различные конструктивные особенности по закреплению арматурного элемента в бетоне. Для определения параметров напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента используется модель составного стержня А.Р. Ржаницына, адаптированная для решения задач с учетом нелинейных эффектов, сопровождающих процесс деформирования армированного стержня. Спецификой предлагаемого подхода является возможность моделирования процесса трещинообразования в виде системы эволюционирующих дискретных трещин. Полученные результаты позволяют вводить в расчет жесткость связей сдвига различного типа. Методика расчета учитывает традиционный распределенный тип контакта между арматурой и бетоном. В работе также представлен подход для учета дискретного типа контакта арматурного элемента с бетонным элементом, что имеет место при усилении железобетонных конструкций, а также в постнапряженных конструкциях.

Предлагаемая модель позволяет рассматривать железобетонные конструкции с обычным армированием, также имеется возможность определять усилие для предварительно напряженных и постнапряженных элементов. Результаты доведены до конечных формул и реализуют численно-аналитический подход при решении задачи.

Ключевые слова: сцепление арматуры с бетоном, составной стержень, распределенный контакт, дискретный контакт, дискретная трещина, жесткость связей сдвига, постнапряженные конструкции, моностренд

Для цитирования:

Балушкин А.Л. Железобетонные конструкции с различными способами фиксации арматурных элементов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 7-21 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_7



UDC 624.072

REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS WITH DIFFERENT METHODS OF ARMOURING FIXING

A.L. Balushkin

Aleksandr L. Balushkin

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

E-mail: balushkinal@ystu.ru



The article considers the different types of reinforced concrete slabs for construction. They have different features for fixing the reinforcing element in concrete. To determine the parameters of the stress-strain state of a reinforced concrete element we use the A. R. Rzhanitsyn, 's compound bar model. It was adapted to solve problems taking into account the nonlinear effects accompanying the deformation process of a reinforced rod. A specific feature of the approach is the possibility of modelling the crack formation process as a system of evolving discrete cracks. The results allow to introduce different types of shear bond stiffness into the calculation. The method considers the traditional distributed type of contact between reinforcement and concrete. The study also presents an approach to account for the discrete type of contact both between the reinforcement and the concrete elements, which occurs in reinforced concrete structures as well as in post-tensioned structures. The proposed model allows the consideration of reinforced concrete structures with regular reinforcement. It is also possible to determine the forces for prestressed and post-stressed elements. The results are presented as finite formulas and implemented the numerical-analytical approach.

Key words: concrete-to-steel bond, compound bar, distributed contact, discrete contact, discrete crack, shear bond stiffness, post-tensioned structures, monostrand

For citation:

Balushkin A.L. Reinforced concrete constructions with different methods of armouring fixing. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 7-21 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_7



ВВЕДЕНИЕ

В XXI благодаря успехам в материаловедении, развитию технологии железобетона, появилось значительное число армированных конструкций, в которых реализованы разные способы контактного взаимодействия между бетоном и арматурными элементами. Безопасность таких конструкций, а также экономичность и срок службы, определенные с учетом обоснованных требований, для всех стадий жизненного цикла во многом определяются достоверной информацией о параметрах напряженно-деформированного состояния (НДС) армирования. Железобетон – многокомпонентный конструкционный материал – реализован и внедрен в практику строительства благодаря сочетанию трех особенностей взаимодействия бетона и стального армирования. Прежде всего это свойство взаимного деформирования бетона и стали, защитная функция бетона по отношению к стальной арматуре, а также близкие коэффициенты температурных деформаций. Взаимность деформирования материалов обеспечивается образованием связей сдвига в зоне непосредственного контакта бетона и стальной арматуры.

В практике возведения ЖБК реализованы две разновидности контакта.

1-й тип – непрерывный распределенный контакт по длине элемента сплошной или в виде участков конечной длины. Подобный тип контакта имеет место для большинства железобетонных элементов (ЖБЭ), которые изготовлены по традиционной технологии обычного или предварительно напряженного железобетона. Наличие комбинации из участков с распределенным сцеплением и протяженных участков без сцепления, характерно для эксплуатируемых ЖБЭ, имеющих существенные повреждения защитного слоя бетона, вследствие проявления износных процессов, коррозии арматуры, температурных воздействий в диапазоне климатических отрицательных температур, а также от воздействия повышенных и высоких температур.

2-й тип контакта арматуры и бетона в ЖБЭ реализуется в виде дискретных связей, воспринимающих сдвигающие и поперечные (в направлении высоты сечения) усилия. Такой способ взаимодействия армирования с железобетонным элементом реализован в конструкциях с постнапряжением предварительно напряженной (ПН) арматуры при усилении железобетонных элементов внешним армированием, а также в некоторых сталежелезобетонных элементах. Минимальное количество связей должно фиксировать арматурный элемент только по концам, что эквивалентно по работе своеобразной «затяжке». Дискретные связи сдвига также могут быть установлены в промежуточных точках в пролете элемента, но количество таких закреплений, как правило, не превышает 5. Положение промежуточных точек согласовывается с точками «нулевых» моментов, а также

расположением технологических швов бетонирования. Развитие и внедрение постнапряженных ЖБК не только в транспортном, но и в гражданском строительстве, актуализировало проблему расчета ЖБЭ с различными условиями контакта арматурного элемента с бетоном. Особенность таких конструкций в том, что трасса моноили мультитренда не прямолинейна. ПН арматурный элемент, выполняемый, как правило, в виде моностренда размещается в объеме железобетонной конструкции по криволинейной траектории как по высоте сечения, так и в плане.

В практике применения ЖБК существуют элементы, в которых, распределенный контакт дополнительно усиливается дискретно расположенными анкерами (как правило, на концах элемента). Существуют и другие более сложные типы контакта армирования с бетоном, в частности в сборно-монолитных перекрытиях системы BabblerDeck или разработанных на ее основе системах: Airdeck, Beeplate, Cobiax, DonutType, Nautilus, U-Boot Beton и др. Часть продольного армирования располагается в железобетонном элементе – несъемной опалубке заводского изготовления, другая часть арматуры устанавливается по месту в монолитной части конструкции. При такой технологии арматура, расположенная в растянутой или сжатой зонах сечения, может иметь разные способы фиксации и будет иметь разные жесткости сцепления.

При всех разнообразиях армирования в расчетах ЖБЭ на всех этапах жизненного цикла главным является получение максимально достоверной информации об усилении в арматурном элементе N_s или соответственно относительной деформации $\varepsilon_s = N_s / (E_s A_s)$. С учетом данных параметров можно оценить характер НДС во всех микрообъемах бетона на всех стадиях деформирования, включая критические, для обоснования рисков прогрессирующего обрушения. Параметры НДС дискретного арматурного элемента: продольное усилие - N_s , нормальное напряжение - σ_s , относительная деформация - ε_s , взаимный сдвиг относительно бетонной части элемента - g_s . Наиболее распространенные типы ЖБЭ с различными способами закрепления арматуры представлены на рис. 1.

Совместная работа бетона и армирования при всех видах деформирования обеспечивается наличием прямого (непосредственного) контакта между компонентами ЖБЭ. В понятии совместная работа – то есть совместное деформирование – предполагается факт, что деформации бетона и контактирующих с ним волокон арматурного элемента будут подобными. Это не означает априори факт того, что в конкретной точке стержня, в зоне контакта, приращения относительных деформаций бетона и арматуры совпадают $\Delta\varepsilon_b \equiv \Delta\varepsilon_s$. Для реальных ЖБЭ имеет место соотношение $\Delta\varepsilon_b \cong \Delta\varepsilon_s$ или $\Delta\varepsilon_b \approx \Delta\varepsilon_s$, при очень «жестком» или, как принято употреблять при использовании методов расчета по СП 63.13330.2012 [12],



«обеспеченном» сцеплении в стадии упругой работы. Если сцепление податливое, то для эксплуатируемых элементов $\Delta\varepsilon_b \neq \Delta\varepsilon_s$, и тогда уместнее использовать термин взаимное деформирование.

Контакт между бетоном и армирующим элементом обеспечивают поперечные связи, как правило, абсолютно жесткие и связи, работающие на сдвиг – воспринимают сдвигающие усилия $T_s(x)$ или сдвигающие напряжения (напряжения сцепления) $\tau_g(x) = T'_s(x)$, x – текущая координата по длине стержня. Физически контакт между арматурным элементом и бетоном обеспечивается сцеплением.

В обычных ЖБЭ с гибкой арматурой внешние силовые факторы воздействуют на бетон. Бетон деформируется, за счет сцепления включается в работу арматура, но с

некоторой задержкой по времени и интенсивности деформаций. Это вызвано тем, что связи сдвига обладают конечной жесткостью $G_{iink}(x)$ (податливостью $G_{iink}^{-1}(x)$), которая реально является переменной величиной по длине элемента.

Характер распределения деформаций и напряжений на участках с трещинами наиболее подробно рассматривался в работах Н.И. Карпенко [6, 7] и его последователей, а также в работах М.М. Холмянского [14] и представителей его школы.

В качестве расчетной модели используются основные положения теории составных стержней А.Р. Ржаницына [9] с учетом специфики, присущей железобетонным стержневым элементам.

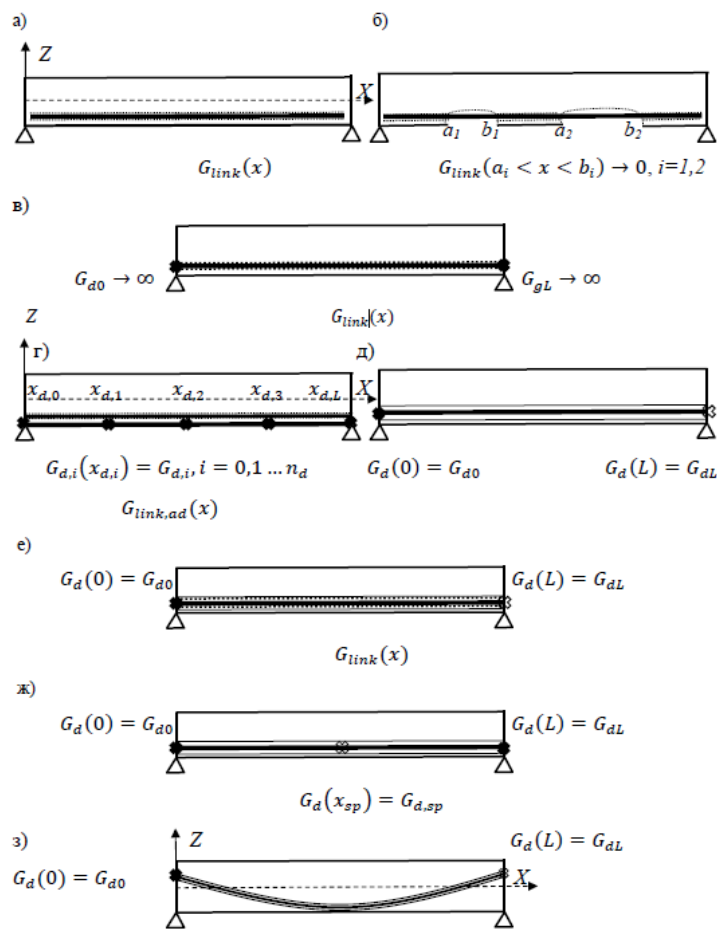


Рис. 1. Изгибаемые железобетонные элементы с разными типами контакта:

- ◆ - активный анкер, используемый для фиксации и натяжения арматурного элемента;
- ⊗ - пассивный анкер предназначен только для фиксации арматурного элемента

Fig. 1. Flexible reinforced concrete elements with different types of contact

- ◆ - active anchor used to fix and tension the reinforcing element;
- ⊗ - the passive anchor is intended only for fixing the reinforcing element



На рис. 1 показано:

а) Распределенный непрерывный контакт по всей длине – это элементы с обычной арматурой, находящиеся в нормативном техническом состоянии;

б) Распределенный контакт с участками конечной длины в сочетании с участками, где сцепление полностью отсутствует. Железобетонный элемент, имеющий участки разрушенного защитного слоя. Такой случай может иметь место как дефект изготовления или транспортировки, но чаще это механическое повреждение или повреждение вследствие развития процесса коррозии арматуры;

в) Распределенный непрерывный контакт по всей длине с дополнительными анкерами по концам. Дополнительные анкера – закладные детали, к которым фиксируется продольная арматура для усиления анкеровки;

г) Размещение дополнительного арматурного элемента с фиксацией к существующей арматуре. Реализуется в нескольких вариантах: закрепление дополнительной арматуры только по концам, закрепление в виде системы анкеров, размещенных по всей длине элемента, закрепление по всей длине элемента. Это реализация способа усиления обычного ЖБЭ методом наращивания с растянутой зоны путем увеличения продольного армирования. В первых двух вариантах используется стальная арматура, в третьем варианте композитная в виде холстов, полотен, ламелей, жгутов или композитных стержней. Наиболее эффективный вариант усиления – использование композитов на основе углеродных волокон;

д) ЖБЭ с постнапряжением. Размещение арматурного элемента в канале или в пазах без инъецирования с установкой анкеров для фиксации ПН арматурного элемента только по концам;

е) Постнапряженный элемент с 2-мя анкерами, установленными по концам и с последующим инъецированием канала. Схемы в) и е) похожи, поскольку в обеих реализован распределенный по длине контакт, усиленный по концам анкерами (е) или опорными закладными деталями (в). Можно трактовать как контакт арматуры с бетонным элементом по концам с последующей организацией контакта по всей длине элемента, но который выполнен по различным технологиям. В варианте в) жесткость сцепления $G_{link}(x)$ предопределяется свойствами бетона всего элемента, в варианте е) для инъецирования канала можно использовать разные составы с модулем деформации $E_{can,inj} \leq E_b$, отличным от модуля деформации бетонного элемента.

ж) Постнапряженный элемент без инъецирования канала. Элемент имеет по концам два активных анкера для натяжения арматуры. В средней части установлен глухой, пассивный симметричный анкер. Такое конструктивное решение может использоваться при большой длине конструкции и соответственно ПН элемента, а

также для возможности устройства технологических швов бетонирования.

з) Постнапряженный элемент, имеющий криволинейную трассу канала для размещения моностренда. Арматурный элемент имеет начальную кривизну по высоте сечения и по длине железобетонной конструкции.

Рассматривается железобетонный элемент с двойной гибкой арматурой, расположенной в верхней и нижней частях сечения. Арматура имеет площади поперечного сечения соответственно: A_{s1} , A_{s2} . Таким образом, элемент представляет собой составной стержень, состоящий из трех ветвей: в центре расположена бетонная ветвь, вверху и внизу – арматурные ветви. Все ветви соединены между собой абсолютно жесткими поперечными связями и податливыми связями сдвига.

Стержень работает по балочной схеме в условиях поперечного изгиба. В зоне контакта арматурных элементов и бетонной ветви действуют сдвигающие усилия: T_{si} , $i = 1, 2$. При этом в верхней арматурной ветви A_{s1} , возникает сжимающее усилие N_{s1} , в нижней арматурной ветви A_{s2} возникает растягивающее усилие N_{s2} . Бетонная ветвь подвергается действию изгибающего момента и продольных сил. НДС в сечении бетонной ветви может соответствовать НДС внецентренно нагруженного элемента. Если рассматривать обычный железобетонный элемент, когда в арматурных ветвях нет начальных напряжений от предварительного напряжения, температуры и др., то есть $\sigma_{sp0,i} = 0$, $i = 1, 2$, тогда усилия в арматурных ветвях тождественно равны сдвигающим усилиям в соответствующих швах: $N_{si} \equiv T_{si}$, $i = 1, 2$. Сдвигающие усилия изменяются по длине элемента, что приводит к возникновению касательных напряжений в связях сдвига

$$\tau_{gi}(x) = T'_{si}(x), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где x – текущая координата, отсчитываемая по длине стержня. Поскольку связи сдвига податливые, касательные напряжения (в ЖБК принято также идентифицировать их как напряжения сцепления) вызывают образование взаимных сдвигов в швах составного стержня: $\vec{g}_{s,i}(x)$, $i = 1, 2$.

При решении задачи об определении НДС в элементах составного стержня основная задача состоит в определении сдвигающих усилий в соответствующих швах: $T_{si}(x)$, $i = 1, 2$ или усилий в арматурных ветвях: $N_{si}(x)$, $i = 1, 2$. Одновременно решается задача об определении взаимных сдвигов в швах – контактных зонах армированного стержня $g_{si}(x)$, $i = 1, 2$.

Взаимный сдвиг в шве с позиции геометрии – это разность смещений смежных волокон арматурного стержня и соответствующих волокон бетонной ветви в местах расположения арматурных ветвей A_{s1} , A_{s2} определяются соответственно как



$$\begin{aligned} \vec{g}_{s1}(x) &= \vec{u}_{bs1}(x) - \vec{u}_{s1}(x) = \int_0^x (\varepsilon_{s1}(x) - \varepsilon_{bs1}(x))dx + \sum_{i=1}^{n_{crc}} H(x, x_{crc,i}) [g_{s1,i}], \\ \vec{g}_{s2}(x) &= \vec{u}_{s2}(x) - \vec{u}_{bs2}(x) = \int_0^x (\varepsilon_{s2}(x) - \varepsilon_{bs2}(x))dx - \sum_{j=1}^{n_{crc}} H(x, x_{crc,j}) [g_{s2,j}], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{u}_{s,i}(x)$, $i = 1,2$ – перемещение волокон соответствующей арматурной ветви в направлении продольной оси стержня;

$\vec{u}_{bs,i}(x)$, $i = 1,2$ – перемещения волокон бетонной ветви, расположенных на уровне центра тяжести соответствующей арматурной ветви по направлению продольной оси стержня;

$$H(x, x_{crc,j}) = \begin{cases} 0, & x < x_{crc,j} \\ 1, & x \geq x_{crc,j} \end{cases} \text{ – функция Хевисайда;}$$

j – номер трещины по длине элемента;

n_{crc} – общее число нормальных трещин;

$[g_{s,i,j}]$ – скачки деформаций взаимного сдвига и скачки смещений бетона на уровне центра тяжести соответствующих арматурных ветвей, имеющие место в трещине.

С позиций силового деформирования взаимный сдвиг между ветвями определяется с учетом зависимости между напряжениями в связях сдвига и жесткостью связей сдвига (жесткость сцепления):

$$\vec{g}_{s,i}(x) = -G_{link,i}^{-1}(x)\tau_{gi} = -G_{link,i}^{-1}(x)T'_{si}(x), \quad (3) \\ i = 1,2,$$

где $G_{link,i}(x)$, $i = 1,2$ – жесткость связей сдвига в соответствующих швах составного стержня $i = 1$ соответствует шву, где расположена арматурная ветвь A_{s1} , $i = 2$ для A_{s2} соответственно.

В формуле (3) параметр $G_{link,i}(x)$ – жесткость связей сдвига – это скалярная величина определяется с учетом того, что общий сдвиг между ветвями составного стержня определяется как

$$g_{s,i}(x) = g_{w,i}(x) + g_{b,i}(x), \quad i = 1,2. \quad (4)$$

Сдвиг между ветвями происходит на участке бетонной стенки шириной $m_0 - a_{s,2}$, $i = 2$. Обозначим его как $g_w(x)$. Другая часть сдвига происходит в контактном слое. Это взаимный сдвиг между арматурой и окружающим бетоном $g_{bond}(x)$, или сокращённо $g_b(x)$ [14].

Жесткость связей сдвига определяется из соотношения

$$\frac{1}{G_{link}(x)} = \frac{1}{G_w(x)} + \frac{1}{G_{bond}(x)} \quad (5)$$

В данном выражении $G_w(x)$ определяет жесткость продольному сдвигу участка бетонной ветви в пределах расстояния между центрами тяжести бетонной и соответствующей арматурной ветви; $G_{bond}(x)$ – жесткость области непосредственного контакта бетонной ветви с арматурными ветвями, н/мм² (МПа).

У реальных ЖБК жесткость связей сдвига $G_{link}(x)$ имеет конечное значение и в процессе эксплуатации имеет тенденцию к снижению вследствие проявления

износных процессов и/или действия агрессивных факторов внешней среды. При силовом деформировании в сечении с трещиной $G_{link}(x) \rightarrow 0$. В процессе деформирования ЖБЭ образуется система дискретных трещин. Факт упоминания о реальной физической картине процесса трещинообразования, а также попытки рассмотрения работы изгибаемых элементов с отдельно расположенными нормальными трещинами по длине элемента предпринимались ранее разными исследователями в частности в работах [1, 5, 13]. Наиболее удачной и математически обоснованной следует признать «блочную модель» (возможно впервые упомянутую в работе В.Н. Байкова [1]), имевшую значительное расчетное обоснование в работах В.В. Белова, П.И. Васильева, Е.Н. Пересыпкина, Г.П. Яковленко и других последователей данной школы.

В сталежелезобетонных постнапряженных конструкциях (без инъецирования каналов) при усилении железобетонных балок внешней арматурой имеет место дискретное расположение связей сдвига (рис. 2). Деформации взаимного сдвига имеют место только в местах закрепления арматурного элемента. Между точками закрепления, если не учитывать трение, усилия между ветвями стержня и сдвиговые деформации не возникают, на этих участках возникает только взаимное смещение арматурного элемента относительно бетонного, внешние усилия в зоне непосредственного контакта бетона и арматурного элемента никакой работы на этих участках не совершают. Если размеры участков закреплений арматурного элемента существенно меньше длины стержня, то в точках закрепления имеет место сосредоточенный сдвиг. Значение сдвигающего усилия между двумя смежными связями имеет постоянное значение, тогда $T'_s(x) = \tau_{gs}(x) = 0$. В месте расположения дискретной связи j имеет место скачок значения сдвигающего усилия $\Delta T_{s,i,j}$.

Выражение для сдвигающего усилия по длине элемента можно записать с использованием функции Хевисайда $H(x, x_{d,j})$:

$$T_{s,i}(x) = T_{s,i}(0) + \sum_{j=0}^{j=n_d} H(x - x_{d,j}) \Delta T_{s,i,j}, \quad (6)$$

где n_d – общее число закреплений арматурного элемента по длине;

$\Delta T_{s,i,j} = T_{s,i,j+1} - T_{s,i,j}$ – скачок сдвигающего усилия в месте расположения связи j по длине элемента;

$T_{s,i,j}$ – сдвигающее усилие для i -арматурной ветви (шва) в месте расположения связи с номером j по длине элемента.



Выражение взаимного сдвига и жесткости связей сдвига по длине элемента можно записать, используя аппарат обобщенных функций

$$G_{d,i}(x) = \sum_{j=1}^{j=n_d} G_{d,i,j} \delta(x - x_{d,j}), \quad (7)$$

где $G_{d,i,j}$ – жесткость на сдвиг дискретной связи для i -арматурной ветви (шва) в месте расположения связи с номером j по длине элемента;

$x_{d,j}$ – координата точки дискретной связи по длине элемента.

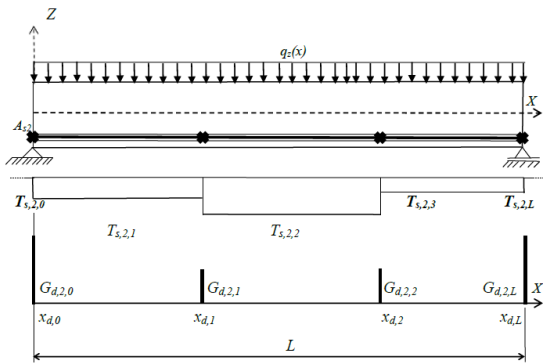


Рис. 2. Схема железобетонной балки с дискретным закреплением арматурного элемента.

Показаны эпюры сдвигающих усилий и жесткости дискретных связей сдвига

Fig. 2. Scheme of a reinforced concrete beam with discrete fastening of the reinforcing element.

Diagrams of shearing forces and stiffness of discrete shear bonds are shown

В дальнейших расчетах для параметра $\delta(x)$ – дельта-функции Дирака – используется наиболее простое представление в виде $h_\Delta(x)$ – дельтообразной функции с учетом рекомендаций [10]:

$$\delta(x) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} h_\Delta(x), \quad (8)$$

$$h_\Delta(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{при } x \in [-\Delta/2, \Delta/2], (\Delta > 0), \\ 0 & \text{при } x \in]-\infty, -\Delta/2[\cup \Delta/2, \infty[. \end{cases}$$

Взаимный сдвиг $g_{s,i}(x)$ определяется с учетом выражения (3), но имеет ненулевое значение только в точках закрепления

$$g_{s,i}(x) = -\frac{T'_{s,i}(x)}{G_{d,i}(x)} = -\frac{\sum_{j=0}^{j=n_d} \Delta T_{s,i,j} \delta(x-x_{d,j})}{\sum_{j=1}^{j=n_d} G_{d,i,j} \delta(x-x_{d,j})} \quad (9)$$

Если дискретные связи в пролете имеют одинаковую жесткость, расположены с постоянным шагом (s_d), при числе связей в пролете $n_d - 2 \geq 5$ тип связей сдвига можно заменить, приняв равномерно распределенные по длине связи с жесткостью $G_{bond,i} = G_{d,i}/s_d$. При

уменьшении шага закреплений арматурной ветви, когда $s_d \rightarrow \Delta x$, значения деформации сдвига определяются как

$$g_{s,i,j} = -T'_{s,i}(x) G_{d,i}^{-1} \delta(x - x_{d,i,j}) = -\frac{T_{s,i,j+1} - T_{s,i,j}}{\Delta x} \frac{\Delta x}{G_{d,i}} = -\frac{T_{s,i,j+1} - T_{s,i,j}}{G_{d,i}}, \quad (10)$$

$$j = 1, 2 \dots n_d - 1,$$

где $x_{d,i,j}$ – j -координата точки закрепления i -арматурной ветви.

Если жесткость закреплений арматурной ветви по длине отличается, значение сосредоточенного сдвига в случае дискретных связей определяется как

$$g_{s,i,j} = -\frac{T_{s,i,j+1} - T_{s,i,j}}{G_{d,i,j}}, \quad j = 1, 2 \dots n_d - 1. \quad (11)$$

Деформации сдвига $g_{s,i,0}, g_{s,i,n_d}$ определяются из граничных условий, поскольку конструкции опорных и промежуточных закреплений (анкеров) могут отличаться.

Взаимный сдвиг между ветвями составного стержня $\vec{g}_{s,i}(x)$, $i = 1, 2$ – векторная величина, имеющая алгебраический знак. В расчетах реальных железобетонных элементов знак деформации сдвига значения не имеет. Для перехода к скалярным величинам, интегральное уравнение (2) преобразуется в дифференциальное, если применить процедуру вычисления дивергенции. Дивергенция – это линейный дифференциальный оператор, отображающий векторное поле на скалярное, для каждой точки стержня. В задачах исследования стержней (одномерный случай) дивергенция определяется как $div \vec{g}_{s,i}(x) = g'_{s,i}(x)$, $i = 1, 2$.

При вычислении дивергенции функции взаимных сдвигов $div \vec{g}_{s,i}(x)$, $i = 1, 2$ учтено, что после образования трещин функция $g_{s,i}(x)$ по длине стержня имеет разрывы первого рода. Выражение дивергенции записано в виде обобщенной производной. Приращение взаимного сдвига по длине получаем, дифференцируя выражения (2) с учетом правил дифференцирования обобщенных функций [2]:

$$g'_{s,i}(x) = \{g'_{s,i}(x)\} - \sum_{j=1}^{n_{crs}} \delta(x - x_{crs,j}) [g_{s,i,j}]. \quad (12)$$

Объединяя выражения для сдвига (2) и (3), получаем

$$div \vec{g}_{s,i}(x) = \Delta \epsilon_{g,i}(x) + \sum_{j=1}^{n_{crs}} \delta(x - x_{crs,j}) [g_{s,i}]|_{x_{crs,j}} = (-G_{link,i}^{-1}(x) T'_{s,i}(x))', \quad i = 1, 2. \quad (13)$$

Применение процедуры дивергенции переводит функцию потока векторного поля $\vec{g}_{s,i}$ в скалярное поле плотности источников деформаций взаимного сдвига. По физическому смыслу – это разность относительных деформаций смежных волокон в шве составного стержня $\Delta \epsilon_{g,i}(x)$. Для численной реализации уравнение (13) записывается в традиционном виде

$$(14)$$



$$\begin{aligned} (-G_{link,i}^{-1}(x)T'_{s,i}(x))' &= \varepsilon_{s,i}(x) - \varepsilon_{bs,i}(x) + \\ &+ \sum_{j=1}^{n_{crc}} \delta(x - x_{crc,j}) [g_{s,i}]|_{x_{crc,j}}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$i = 1, 2.$$

Здесь $\varepsilon_{s,i}(x)$ – относительная деформация i -арматурной ветви; $\varepsilon_{bs,i}(x)$ – относительная деформация волокон бетонной ветви, расположенных на уровне центра тяжести i -арматурной ветви; $[g_{s,i}]|_{x_{crc,j}}$ – скачок деформаций взаимного сдвига в сечении с трещиной, (по абсолютной величине численно равен ширине раскрытия нормальной трещины) имеющей координату по длине элемента $x_{crc,j}$; j – номер трещины по длине.

Определяя значения относительных деформаций арматуры и смежных волокон бетонной ветви и используя соотношения сопротивления материалов, окончательно получается уравнение для определения сдвигающего усилия в контактной зоне железобетонного элемента T_s . Знак минус определяет очертание эпюры взаимных сдвигов. Поскольку уравнение оперирует со скалярными величинами, алгебраический знак опускаем. Для элемента с армированием только в нижней зоне (A_{s2}) получается

$$(T'_{s2}G_{link2}^{-1})' = T_{s2}\Delta_{22} + \Delta_{2p}, \quad 0 < x < L, \quad (15)$$

где $\Delta_{22} = \bar{\varepsilon}_{s2}(x) - \bar{\varepsilon}_{bs2}$ – коэффициент канонического уравнения метода сил, численно равный разности относительных деформаций арматурной ветви и волокон бетонной ветви на уровне центра тяжести растянутой арматурной ветви при действии $T_{s2} = 1$,

$$\Delta_{22} = \frac{1}{E_{s2}A_{s2}} + \frac{1}{A_e} + \frac{(m_0 - a_2)^2}{B_e} F_2(\omega, z), \quad (16)$$

где B_e ; A_e ; m_0 – характеристики сечения бетонной ветви: соответственно жесткость при изгибе, жесткость при сжатии, расстояние от нижней грани до центра тяжести;

Δ_{2p} – свободный член уравнения, равный сумме относительных деформаций, возникающих от действия внешних силовых факторов в стержнях основной системы, вычисленных на уровне центра тяжести арматурных ветвей и приращения сосредоточенного взаимного сдвига в сечении с возможной трещиной:

$$\begin{aligned} \Delta_{2p} &= -\frac{M(x)}{B_e} (m_0 - a_2) F_2(\omega, z) + \\ &+ \sum_{j=1}^{n_{crc}} \delta(x - x_{crc,j}) [g_{s2,j}]|_{x_{crc,j}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$F_2(\omega, z) = \left(1 + \frac{\sum \bar{\omega}_k}{A_e(m_0 - a_2)}\right) \left(1 - \frac{\sum \bar{\omega}_k z_k}{B_e}\right)^{-1} \quad (18)$$

где $F_2(\omega, z)$ – функция, учитывающая развитие неупругих деформаций и трещины в бетонной ветви;

$M(x)$ – момент от действия внешней нагрузки;

$\bar{\omega}_k = \omega_k / \rho^{-1}$, z_k – функции влияния, учитывающие развитие неупругих деформаций в растянутом, сжатом

бетоне и трещинообразование. Данные параметры зависят от стадии деформирования бетонной ветви, принятой диаграммы $\sigma_b - \varepsilon_b$, а также от типа поперечного сечения бетонной ветви.

Дополняя уравнение (15) граничными условиями, получаем математическую формализацию для 1-й краевой задачи, которая наиболее часто имеет место в практических расчетах:

$$\begin{aligned} (T'_{s2}G_{link2}^{-1})' - \Delta_{22}T_s &= \Delta_{2p}, \quad 0 < x < L, \\ T_{s2}(0) &= T_{s20}, \quad T_{s2}(L) = T_{s2L}. \end{aligned} \quad (19)$$

Железобетонный элемент с двойным армированием состоит из трех элементов и имеет два шва. Номера швов составного стержня сверху вниз ($i = 1, 2$) соответствуют арматурам A_{s1}, A_{s2} . Система уравнений и граничные условия выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} (T'_{s1}(x)G_{link1}^{-1}(x))' &= \Delta_{11}(x)T_{s1}(x) + \\ &+ \Delta_{12}(x)T_{s2}(x) + \Delta_{10}(x) \\ (T'_{s2}(x)G_{link2}^{-1}(x))' &= \Delta_{21}(x)T_{s1}(x) + \\ &+ \Delta_{22}(x)T_{s2}(x) + \Delta_{20}(x) \end{aligned} \right\}, \quad (20) \\ 0 < x < L, \\ \left. \begin{aligned} T_{s1,0} - \kappa_{11}T_{s1,1} &= \mu_{11}, \\ T_{s1,N} - \kappa_{12}T_{s1,N-1} &= \mu_{12}, \\ T_{s2,0} - \kappa_{21}T_{s2,1} &= \mu_{21}, \\ T_{s2,N} - \kappa_{22}T_{s2,N-1} &= \mu_{22}. \end{aligned} \right\}, \quad (21) \end{aligned}$$

Выражение для граничных условий, необходимое для формирования системы разностных уравнений, записывается в общем виде, позволяющем учитывать шарнирное опирание и жесткое защемление на опоре [11].

1. При шарнирном опирании решается 1-я краевая задача (задача Дирихле) $\kappa=0, \mu=0$.

2. Жесткая заделка на опоре соответствует 2-й краевой задаче (задача Неймана) $\kappa=1, \mu=0$. Жесткая заделка может быть принята при моделировании работы статически неопределимых монолитных балок и рам для стадии работы 1 и 2.

3. Податливое закрепление на опоре моделируется 3-й краевой задачей (задача Робена) $\kappa \neq 0, \mu \neq 0$. Имеет место при расчете сборных каркасов и при расчете монолитных балок в предельной стадии, а также когда арматурный элемент, имеющий распределенный контакт с бетоном по длине, на опоре фиксируется податливым анкером (закладной деталью).

При различных способах фиксации арматурного элемента с бетонной частью в ЖБЭ имеют место разные типы уравнений для определения усилия в дискретном арматурном элементе N_s .

Элемент с распределенным контактом (сцеплением) по всей длине (см. рис. 1, а).

Согласно СП 63.13330.2018, для расчета нормальных сечений стержневых элементов принята деформационная модель, в таком случае продольное усилие в арматуре N_s определяется при «обеспеченном сцеплении» или абсолютно жестком контакте арматуры с бетоном. Для



обычных ЖБЭ относительные деформации арматуры и бетона равны $\varepsilon_s(x) = \varepsilon_{bts}(x)$ или $\varepsilon_s(x) - \varepsilon_{bts}(x) = g'_s(x) = 0$. Для элементов, имеющих в составе армирования ПН арматурные элементы, условие взаимности деформирования бетона и арматурного элемента записывается для приращений относительных деформаций как

$$\Delta\varepsilon_s(x) - \Delta\varepsilon_{bts}(x) = \Delta g'_s(x) = 0, \quad (22)$$

$$N_s = \frac{M \cdot (h_0 - x)}{B} E_s A_s.$$

В данной формуле M – изгибающий момент в рассматриваемом сечении от внешней нагрузки; x – высота сжатой зоны; h_0 – рабочая высота сечения; B – жесткость при изгибе.

У большинства реализованных и эксплуатирующихся ЖБЭ жесткость контакта арматуры с бетоном или жесткость сцепления имеет конечное значение $0 < G_{link,i}(x) < \infty$. Поэтому в процессе силового деформирования приращения относительных деформаций арматуры и окружающего бетона в одной точке по длине не будут совпадать $\Delta\varepsilon_s(x) \neq \Delta\varepsilon_{bts}(x)$, $\Delta\varepsilon_s(x) - \Delta\varepsilon_{bts}(x) = \Delta g'_s(x) \neq 0$. При этом определение параметров НДС арматурного элемента по формуле (22) может давать значительные погрешности, которые будут возрастать, если $G_{link,i}(x) \rightarrow 0$.

В качестве базовой расчетной модели используется модель составного стержня с абсолютно жесткими поперечными связями и связями сдвига, распределенными по длине элемента в виде участков с различной жесткостью $G_{link,i}(x)$, $i = 1, 2 \dots n_{yч.}$, также по длине элемента могут быть установлены дискретные абсолютно жесткие или податливые дискретные анкеры, имеющие жесткость $G_{a,j}$, $j = 1, 2 \dots n_d$.

Первая краевая задача

$$(T'_{s2} G_{link2}^{-1})' - \Delta_{22} T_s = \Delta_{2p}, \quad 0 < x < L, \quad (23)$$

$$T_{s2}(0) = T_{s20}, \quad T_{s2}(L) = T_{s2L}.$$

Подстрочный индекс «2» обозначает арматурный элемент, расположенный в нижней части сечения. Для обычных ЖБЭ $N_{s2}(x) = T_{s2}(x)$.

ЖБЭ, имеющий по длине участки оголенной арматуры (см. рис. 1, б).

Элемент с участками без сцепления. Решение уравнения (19) осуществляется методом конечных разностей с использованием неявных разностных схем. Для построения разностной схемы используется метод конечных объемов. Для решения системы уравнений используется метод «поточковой прогонки», который позволяет адаптировать алгоритм расчета, при котором коэффициенты уравнения сильно меняются в узлах сетки [10, 11]. Принимается разностная схема, монотонная для участков с обеспеченным сцеплением и для участков, на которых $G_{link}(x) = 0$.

ЖБЭ, имеющий распределенное сцепление и усиленный по концам дополнительными дискретными анкерами (см. рис. 1, в).

Усилие в арматуре определяется из решения второй краевой задачи:

$$(T'_{s2} G_{link2}^{-1})' - \Delta_{22} T_s = \Delta_{2p}, \quad 0 < x < L, \quad (24)$$

$$T'_{s2}(0) = 0, \quad T'_{s2}(L) = 0.$$

ЖБЭ, усиливаемый внешней арматурой, присоединяемой в отдельных, нескольких точках по длине (см. рис. 1, з).

Рассматривается усиливаемый ЖБЭ. Предварительно жесткость сцепления существующей арматуры (A_{s2}) с бетоном $G_{link,2} \rightarrow \infty$. Присоединяемая снаружи арматура $A_{s2,ad}$ имеет жесткость контакта в дискретных точках $G_{a,i}(x_{d,i}) = G_{a,i}$, $i = 1, 2 \dots n_d$. Значения сдвигающих усилий $\{T_{ad2,i}\}$ определяются из решения системы уравнений. Число уравнений равно $n_d - 1$. В частности, если $n_d = 4$, требуется решить систему трех уравнений, которая получается при рассмотрении сдвигов

$$g_{ad2}(x_i) = g_{ad2,i} = (T_{ad2,i+1} - T_{ad2,i}) G_{dad2,i}^{-1}, \quad i = 1, 2 \dots n_d - 2$$

и интегрировании уравнения (13) для каждого участка между смежными точками закрепления:

$$\begin{cases} T_{ad2,1} (G_{dad2,0}^{-1} - G_{dad2,1}^{-1} - a_1) + T_{ad2,2} G_{dad2,1}^{-1} = b_1, \\ T_{ad2,1} G_{dad2,1}^{-1} - T_{ad2,2} (G_{dad2,1}^{-1} + G_{dad2,2}^{-1} + a_2) + T_{ad2,3} G_{dad2,2}^{-1} = b_2, \\ T_{ad2,2} G_{dad2,2}^{-1} + T_{ad2,3} (G_{dad2,2}^{-1} - G_{dad2,2}^{-1} - a_3) = b_3; \end{cases}$$

$$a_i = \int_{x_{d,i-1}}^{x_{d,i}} \Delta_{22}(x) dx; \quad b_i = \int_{x_{d,i-1}}^{x_{d,i}} \Delta_{2p}(x) dx, \quad (25)$$

$$i = 1, 2 \dots n_d - 2$$

Такой подход можно реализовать, если техническое состояние ЖБЭ нормативное. Усиление ЖБК имеет место, как правило, для эксплуатируемых конструкций, находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, в таком случае жесткость сцепления арматуры A_{s2} существенно снижена, а на некоторых участках из-за значительных повреждений защитного слоя бетона $G_{link,2} \rightarrow 0$. Поэтому при определении усилий $N_{s2} = T_{s2}$ в A_{s2} и T_{ad2} в A_{ad2} требуется учитывать податливость контакта обеих арматурных ветвей, расположенных в нижней зоне элемента. Определить $T_{s2}(x)$ и $\{T_{ad2,i}\}$ можно, решив систему дифференциальных уравнений методом векторной прогонки [11].

Арматурный элемент A_{ad2} имеет закрепление к основному ЖБЭ в дискретных точках. Жесткость закреплений против сдвига $\{G_{dad2,i}, i = 1, 2 \dots n_d\}$. В реальных условиях закрепление внешнего элемента усиления A_{ad2} всегда будет реализовано не дискретно, а на участке конечной длины. В таком случае закрепление в дискретных точках можно заменить на фиксацию арматуры на участках конечной длины $\{l_{ad2,i}, i = 1, 2 \dots n_d\}$. Тогда жесткость связей сдвига определится как

$$G_{ad2,i} = \frac{G_{dad2,i}}{l_{ad2,i}}, \quad i = 1, 2 \dots n_d \quad (26)$$

Железобетонный элемент с двойным армированием состоит из трех элементов и имеет два шва. Номера швов составного стержня сверху вниз ($i = 2, 2ad$)



соответствуют арматурам A_{s2}, A_{ad2} . Система уравнений и граничные условия выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (T'_{s2}(x)G_{link,2}^{-1}(x))' &= \Delta_{22}(x)T_{s2}(x) + \\ &+ \Delta_{2,ad}(x)T_{ad,2}(x) + \Delta_{20}(x) \\ (T'_{ad2}(x)G_{ad2}^{-1}(x))' &= \Delta_{ad2,2}(x)T_{s2}(x) + \\ &+ \Delta_{ad2,2}(x)T_{ad,2}(x) + \Delta_{ad20}(x) \\ &0 < x < L; \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{s2,0} &= 0, \\ T_{s2,N} &= 0, \\ T_{ad2,0} - \kappa_{ad2,0}T_{ad2,1} &= \mu_{ad2,0}, \\ T_{ad2,N} - \kappa_{ad2,L}T_{ad2,N-1} &= \mu_{ad2,L}. \end{aligned} \right.$$

Граничные условия для арматуры A_{s2} принимаются первого типа, а для A_{ad2} - третьего типа.

Постнапряженный элемент, армированный прямолинейным монострендом и имеющий анкеры только на концах (см. рис. 1, д).

Задача по определению усилия моно- или мультистренде решается в два этапа. Задается начальный уровень предварительного натяжения арматуры $\sigma_{sp,0}$, определяются первые потери σ_{loss1} , оценивается усилие предварительного натяжения P_{01} . Далее оценивается сдвигающее усилие на этапе создания предварительного обжатия в бетонном элементе. Уравнение получается с учетом соотношения

$$\Delta \varepsilon_{sp}(x) - \Delta \varepsilon_{b,sp}(x) = \Delta g'_{sp,2}(x), \quad (28)$$

которое интегрируется по длине стержня по участкам между смежными анкерами:

$$\int_0^L \Delta g'_{sp,2}(x) dx = g_{sp,2}(L) - g_{sp,2}(0) = T_{sp,2}G_{d,L}^{-1} + T_{sp,2}G_{d,0}^{-1} = T_{sp,2}a_1 + b_1, \quad (29)$$

$$T_{sp,0} = \frac{b_1}{G_{d,L}^{-1} + G_{d,0}^{-1} - a_1}, \quad (30)$$

$$a_1 = \int_0^L \Delta_{22}(x) dx; \quad b_1 = \int_0^L \Delta_{2p}(x) dx, \quad (31)$$

Усилие в ПН арматурном элементе $N_{sp,0} = P_{01} + T_{sp,0}$.

Определяются вторые потери предварительного натяжения от усадки и ползучести бетона σ_{loss2} , рассчитывается P_{02} , $N_{sp,0} = P_{02} + T_{sp,0}$. Затем рассматривается стадия эксплуатации. Коэффициент b_1 зависит от интенсивности изгибающего момента создаваемого внешней нагрузкой на конструкцию. Снова оценивается сдвигающее усилие T_{sp} уже для стадии эксплуатации и окончательно усилие в арматуре $A_{sp,2} - N_{sp,2} = P_{02} + T_{sp}$.

Постнапряженный элемент с инъекцированным каналом для создания контакта ПН элемента с бетоном по всей длине. Также это может быть элемент с предварительно напряженной арматурой с натяжением на упоры, имеющий на концах дополнительные анкеры (см. рис. 1, е).

Усилие в напрягаемой арматуре определяется в два этапа. Первоначально для стадии создания обжатия и затем для стадии эксплуатации.

Для определения сдвигающего усилия требуется решить краевую задачу 3-го типа. Граничные условия определяются из условия, что взаимный сдвиг в дискретном анкере и на конце зоны с распределенным контактом равны, тогда

$$\begin{aligned} T_{s2}(0)G_{d,0}^{-1} &= T'_{s2}(0)G_{link}^{-1}(0), \\ T'_{s2}(0) - \frac{G_{d,0}^{-1}}{G_{link}^{-1}(0)}T_{s2}(0) &= 0, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} T_{s2}(L)G_{d,L}^{-1} &= T'_{s2}(L)G_{link}^{-1}(L), \\ T'_{s2}(L) - \frac{G_{d,L}^{-1}}{G_{link}^{-1}(L)}T_{s2}(L) &= 0; \end{aligned} \quad (33)$$

$$(T'_{s2}G_{link,2}^{-1})' = \Delta_{22}T_{s2} + \Delta_{2p}, \quad 0 < x < L; \quad (34)$$

$$T'_{s2}(0) - \frac{G_{d,0}^{-1}}{G_{link}^{-1}(0)}T_{s2}(0) = 0; \quad (35)$$

$$T'_{s2}(L) - \frac{G_{d,L}^{-1}}{G_{link}^{-1}(L)}T_{s2}(L) = 0. \quad (36)$$

Записывая значения производных для $i = 0$ в передних, а для узла с номером $i = N$ в задних разностях, получаем два дополнительных уравнения для системы уравнений, решая которую методом потоковой прогонки, определяем $\{T_{s2,i}\}$ и $\{g_{s2,i}\}$.

$$\begin{aligned} N_{sp,0}(x) &= P_{01} + T_{s2,2}(x), N_{sp,2}(x) = \\ &= N_{sp,0}(x) + T_{s2}(x) \end{aligned} \quad (37)$$

Выполнив численное дифференцирование, получаем $\{g'_{s2,i}\}$, что дает возможность на основании информации о $\varepsilon_{s,2}(x)$ определить относительные деформации бетонного элемента на уровне центра тяжести ПН арматурного элемента и далее осуществить расчет кривизны $\rho^{-1}(x)$ и других необходимых параметров НДС.

Постнапряженный элемент, имеющий в пролете дополнительный пассивный анкер (см. рис. 1, ж).

Рассматривается постнапряженный элемент с каналом заполненным смазкой, в пролетной зоне расположен пассивный анкер.

Сдвигающее усилие $\{T_{s2,i}\}$ для стадии создания обжатия и в стадии эксплуатации определяется при решении системы двух уравнений:

$$\begin{cases} T_{s2,1}(G_{d,0}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_1) + T_{s2,2}G_{d,1}^{-1} = b_1, \\ T_{s2,1}G_{d,1}^{-1} + T_{s2,2}(G_{d,L}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_2) = b_2; \end{cases} \quad (38)$$

$$T_{s2,1} = \frac{b_1(G_{d,L}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_2) - b_2G_{d,1}^{-1}}{(G_{d,L}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_2) \cdot (G_{d,0}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_1) - (G_{d,1}^{-1})^2}; \quad (39)$$

$$T_{s2,2} = \frac{b_2(G_{d,0}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_1) - b_1G_{d,1}^{-1}}{(G_{d,L}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_2) \cdot (G_{d,0}^{-1} - G_{d,1}^{-1} - a_1) - (G_{d,1}^{-1})^2}. \quad (40)$$

$$a_i = \int_{x_{d,i-1}}^{x_{d,i}} \Delta_{22}(x) dx; b_i = \int_{x_{d,i-1}}^{x_{d,i}} \Delta_{2p}(x) dx, \quad i = 1, 2.. \quad (41)$$

Постнапряженный элемент с монострендом криволинейного очертания (см. рис. 1, з).

Рассматривается постнапряженный элемент с криволинейной трассой ПН моностренда. Канал заполнен смазкой. Активный и пассивные анкеры расположены по концам конструкции. Данное конструктивное



решение используется для армирования как балок в составе перекрытия, так и плит плоских безригельных перекрытий (рис. 3).

Последовательность расчета постнапряженного ЖБЭ с нелинейной трассой моностренда выполняется в два этапа: 1-й – в стадии создания предварительного обжатия, 2-й – в стадии эксплуатации. Подробно этот процесс описан в [3, 4, 7, 8, 15,16].

Предварительно назначается геометрия трассы канала моностренда. Уравнение траектории оси канала для размещения моностренда принимается наиболее простого вида в форме уравнения квадратной параболы. Затем назначается начальный уровень предварительного напряжения $\sigma_{sp,0}$, рассчитываются первые потери σ_{loss1} и определяется усилие предварительного обжатия $P = P_{01} = (\sigma_{sp0} - \sigma_{loss1}) A_{sp} \cos\varphi$. Далее определяется вертикальная составляющая реактивной постоянной нагрузки $g_{pz}(x)$, возникающей из-за криволинейной трассы ПН элемента, и оценивается общая площадь сечения моностренда A_{sp} в первом приближении. Уточняется фактическая длина моностренда L_{sp} . Напряжения σ_{con} , контролируемые в момент возведения перекрытия при осуществлении натяжения арматуры A_{sp} на бетон, определяются с учетом упругого обжатия бетона в соответствии с [4, 15]. Элемент реальной железобетонной конструкции имеет обычное армирование $A_{s1}; A_{s2}$, а также постнапряженное армирование в виде системы монострендов A_{sp} . Для вновь возводимых конструкций жесткость сцепления для обычной арматуры: $A_{s1}; A_{s2} - G_{link,1(2)} \rightarrow \infty$. Дискретные связи сдвига для постнапряженной арматуры A_{sp} имеют конечное значение жесткости при сдвиге G_d .

Приращения относительных деформаций моностренда $\Delta\varepsilon_{sp}(x)$ и волокон бетона, расположенных на уровне центра тяжести сечения моностренда $\Delta\varepsilon_{b,sp}(x)$, определяются с учетом положений теории составных стержней А.Р. Ржаницына на основании данных о значении сдвигающей силы в шве $T_{sp}(x)$ в зоне контакта ПН элемента и бетона. Для расчета моностренда на этапе создания предварительного натяжения в моностренде учитывается упругая работа бетонной части конструкции и предварительно напрягаемого элемента:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{sp}(x) - \Delta\varepsilon_{b,sp}(x) &= g'_{sp}(x). \quad (42) \\ \Delta\varepsilon_{sp} &= \frac{T_{sp}}{E_{sp}A_{sp}}, \\ \Delta\varepsilon_{b,sp} &= e_{sp}(x)\rho^{-1}(x) = \left(e_{sp,0}(x) - \frac{P_{01} + T_{sp}}{A_e} \right) \rho^{-1}(x). \end{aligned}$$

Кривизна, вызываемая силовым деформированием $\rho^{-1}(x)$, определяется из уравнения

$$M(x) = B_e \rho^{-1}(x) + (P_{01} + T_{sp}(x)) e_{sp,0}(x), \quad (43)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении элемента перекрытия от постоянной нагрузки $g(x) + g_{pz}(x)$. Постоянная нагрузка включает собственный вес всех составляющих перекрытия и реактивный отпор, возникающий

вследствие криволинейной трассы канала моностренда по высоте сечения. Для фазы создания натяжения в моностренде временная нагрузка на перекрытие не учитывается;

$e_{sp,0}(x)$ – расстояние от центра тяжести железобетонного сечения до оси канала моностренда,

$$e_{sp,0}(x) = (z_0 - a_{sp,1}(x)) + H(Z''_{cst}(x); 0) \left[m_0 - a_{sp,2}(x) - (z_0 - a_{sp,1}(x)) \right], \quad (44)$$

где $m_0; z_0$ – расстояния от центра тяжести железобетонного сечения до нижней и верхней грани сечения соответственно.

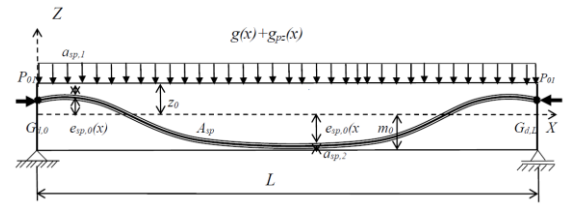


Рис. 3. Схема для расчета постнапряженного элемента перекрытия

для стадии создания натяжения арматуры

Fig. 3. Scheme for calculating the posttensioned floor element

for the stage of reinforcement tensioning

Поскольку моностренд имеет дискретное закрепление в точках: $x(0) = x_0$ и $x(L) = x_L$, интегрируя соотношение (42), получаем

$$\begin{aligned} g_{sp}(L) - g_{sp}(0) &= T_{sp} G_{d,0}^{-1} + T_{sp} G_{d,L}^{-1} = \\ &= \int_0^L (\Delta\varepsilon_{sp} - \Delta\varepsilon_{b,sp}) dx = \\ &= \int_0^L (T_{sp} \Delta_{11} + \Delta_{10}) dx = \\ &= T_{sp} \int_0^L \Delta_{11} dx + \int_0^L \Delta_{10} dx = T_{sp} a_1 + b_1. \end{aligned} \quad (45)$$

Уравнение предназначено для определения одного неизвестного сдвигающего усилия T_{sp} , возникающего в дискретных связях сдвига – активном и пассивном анкерах – местах закрепления моностренда. Коэффициенты уравнения определяются в предположении упругой работы всех компонентов системы

$$\Delta_{11} = \frac{1}{E_{sp}A_{sp}} + \frac{1}{A_e} + \frac{e_{sp,0}(x)^2}{B_e}, \quad (46)$$

$$\Delta_{10} = -\frac{M(x) - P_{01}e_{sp,0}(x)}{B_e} e_{sp,0}(x) + \frac{P_{01}}{A_e}. \quad (47)$$

Сдвигающее усилие определяется из уравнения

$$T_{sp}(G_{d,0}^{-1} + G_{d,L}^{-1}) = T_{sp} a_1 + b_1, \quad (48)$$

$$T_{sp} = \frac{b_1}{G_{d,0}^{-1} + G_{d,L}^{-1} - a_1}. \quad (49)$$



Далее можно определить усилие в арматурной ветви $N_{sp} = P_{01} + T_{sp}$ и усилие в железобетонной части перекрытия $N_b = -P_{01} - T_{sp}$. Затем оценивается кривизна для разных участков по длине элемента как

$$\rho^{-1}(x) = \frac{M(x) - N_{sp}e_{sp,0}(x)}{B_e} \quad (50)$$

Поскольку характер эпюры изгибающего момента $M(x)$ по длине элемента знакопеременный, то кривизна $\rho^{-1}(x)$ также меняет значения. Принимаются положительные значения момента и кривизны если растянуты нижние волокна железобетонного элемента. Высота растянутой зоны, расположенная с нижней стороны (пролетные участки), составит

$$\frac{m}{h} = \frac{m_0}{h} - \frac{N_{sp}}{A_e h \rho^{-1}(x)}, \quad (51)$$

а высота растянутой зоны, расположенная с верхней стороны (участки, примыкающие к опорам):

$$\frac{m}{h} = \frac{z_0}{h} - \frac{N_{sp}}{A_e h |\rho^{-1}(x)|} \quad (52)$$

Относительные деформации крайних растянутых волокон $\varepsilon_{bt}(x)$ и крайних сжатых волокон $\varepsilon_{bc}(x)$ определяются для пролетных сечений с учетом гипотезы плоских сечений:

$$\varepsilon_{bt}(x) = m_0 \rho^{-1}(x) - \frac{N_{sp}}{A_e}, \quad (53)$$

$$\varepsilon_{bc}(x) = z_0 \rho^{-1}(x) + \frac{N_{sp}}{A_e}. \quad (54)$$

Контроль $\varepsilon_{bt}(x) >< \varepsilon_{btu}$ необходим для проверки наличия нормальных трещин.

Контроль $\varepsilon_{bc}(x) < R_b/E_b$ необходим для проверки упругой работы сжатого бетона, чтобы максимально эффективно реализовать режимный характер нагружения перекрытия.

Далее осуществляется расчет в стадии эксплуатации с учетом полученного значения усилия в моностренде в стадии создания обжатия N_{sp} . Значение изгибающего момента $M(x)$ рассчитывается с учетом полной полезной нагрузки на перекрытие.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена процедура определения параметров напряженно-деформированного состояния для железобетонных изгибаемых элементов с восемью различными способами фиксации армирования с бетоном. Предлагаемый подход позволяет учитывать как «традиционный» – распределенный тип контакта арматуры и бетона, так и дискретный тип контакта арматурного элемента, который нашел применение в настоящее время в конструкциях с постнапряжением. Данный метод также позволяет определять усилие в арматуре для железобетонных элементов, имеющих разрушенный защитный слой бетона на участках конечной длины, а также для элементов

с гибридным контактом – это распределенный контакт по всей длине элемента, дополнительно усиленный в дискретных точках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Байков В.Н.** Сцепление арматуры с бетоном в конструкциях. *Бетон и железобетон*. 1968. № 12. С. 14-16.
2. **Владимиров В.С.** Уравнения математической физики. 4-е изд. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. 512 с.
3. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. 2010. 191 с.
4. **Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Семенов В.А.** Статический расчет элементов конструктивных систем с постнапряженными перекрытиями без сцепления арматуры с бетоном. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2017. № 4. С. 11-16.
5. **Карпенко Н.И.** Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат. 1976. 208 с.
6. **Карпенко Н.И.** Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат. 1996. 416 с.
7. Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Правила проектирования: Методическое пособие. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2017. 109 р.
8. **Портаев Д.В.** Расчёт и конструирование монолитных преднапряжённых конструкций гражданских зданий. М.: Издательство АВС. 2011. 248 с.
9. **Ржаницын А.Р.** Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат. 1986. 316 с.
10. **Самарский А.А., Андреев В.Б.** Разностные методы для эллиптических уравнений. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». 1976. 352 с.
11. **Самарский А.А., Николаев Е.С.** Методы решения сеточных уравнений. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». 1978. 592 с.
12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2018. 118 с.
13. **Тихий М., Ракосник Й.** Расчет железобетонных рамных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий. Пер. с чешск. М.: Стройиздат. 1976. 198 с.
14. **Холмянский М.М.** Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат. 1981. 184 с.
15. **Шарипов Р.Ш., Зенин С.А., Кудинов О.В.** Проблемы расчета предварительно напряженных железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном по первой и второй группам предельных состояний и



способы их решения. *Архитектура и строительство*. 2017. № 1. С. 129-132.

16. TR 43. Post-tensioned Concrete Floors. Design Handbook. The Concrete Society, 1994. 151 с.

Поступила в редакцию 06.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

1. **Baikov V.N.** Bond of reinforcement with concrete in structures. *Beton i zhelezobeton*. 1968. N 12. P. 14-16 (in Russian).
2. **Vladimirov V.S.** Equations of mathematical physics. M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury. 1981. 512 p. (in Russian).
3. Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General rules and regulations for buildings. Minsk: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii. 2010. 191 p. (in Russian).
4. **Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V., Semenov V.A.** Static calculation of elements of structural systems with post-stressed floors without bond of reinforcement to concrete. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2017. N 4. P. 11 (in Russian).
5. **Karpenko N.I.** The theory of deformation of cracked reinforced concrete. M: Strojizdat. 1976. 208 p. (in Russian).
6. **Karpenko N.I.** General models of reinforced concrete mechanics. M.: Strojizdat. 1996. 416 p. (in Russian).
7. Monolithic reinforced concrete structures with prestressing reinforcement without bond to concrete. Design rules: Methodological guide. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii. 2017. 109 p. (in Russian).
8. **Portaev D.V.** Calculation and design of monolithic prestressed structures of civil buildings. M.: Izdatel'stvo AVS. 2011. 248 p. (in Russian).
9. **Rzhanitsyn A.R.** Built-up bars and plates. M.: Strojizdat. 1986. 316 p. (in Russian).
10. **Samarskiy A.A., Andreev V.B.** Difference methods for elliptic equations. M.: Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka». 1976. 352 p. (in Russian).
11. **Samarskiy A.A., Nikolaev E.S.** Methods for solving grid equations. M.: Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka». 1978. 592 p. (in Russian).
12. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. M.: Standartinform. 2012. 118 p. (in Russian).
13. **Tikhy M., Rakosnik J.** Calculation of reinforced concrete frame structures in the plastic stage. Redistribution of efforts. Per. from Czech. M.: Strojizdat. 1976. 198 p. (in Russian).

14. **Kholmyanskiy M.M.** Reinforcement contact with concrete. M.: Strojizdat, 1981. 184 p. (in Russian).

15. **Sharipov R.Sh., Zenin S.A., Kudinov O.V.** Problems of calculating prestressed reinforced concrete structures without bond of reinforcement to concrete according to the first and second groups of limiting states and methods for their solution. *Arhitektura i stroitel'stvo*. 2017. N 1. P. 129 (in Russian).

16. TR 43. Post-tensioned Concrete Floors. Design Handbook. The Concrete Society. 1994. 151 с.

Received 06.09.2021

Accepted 20.09.2021



УДК 691.3

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИСТРУКТУРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

А.А. Овчинников¹, Д.В. Обручев², И.Н. Данилов²

Александр Александрович Овчинников

¹Общество с ограниченной ответственностью «СтройКом», 2-й Совхозный пер., 19, Иваново, Российская Федерация, 153023

E-mail: nisigasa@mail.ru

Дмитрий Витальевич Обручев

²Общество с ограниченной ответственностью «Экспресс-Партнер» ул. Витебская, 24, Иваново, Российская Федерация, 153029

E-mail: nisigasa@mail.ru

Игорь Николаевич Данилов

³Общество с ограниченной ответственностью «Экспресс-Партнер» ул. Витебская, 24, Иваново, Российская Федерация, 153029

E-mail: nisigasa@mail.ru



Статья направлена на обобщение теоретических представлений о зависимости эксплуатационных характеристик композиционных материалов от их состава и структуры. В ней, исходя из полиструктурной теории бетона, формулируются положения о влиянии компонентов на различные структурные уровни композита, экспериментально доказывается возможность качественного управления свойствами материалов и конечных объектов городской инфраструктуры на их основе. В статье приводится анализ особенностей технологических и конструктивных решений малых архитектурных форм, применяемых для создания условий повышения качества и комфорта городской среды и участвующих в мероприятиях по ее благоустройству. Рассмотрены существующие и перспективные варианты применения композиционных материалов при производстве объектов городской среды. Проведена деконструкция основных свойств композиционных материалов в разрезе уровней организации структуры композита. Предложены теоретические решения для интеграции разнородных материалов в единый композит на различных структурных уровнях. Представлены результаты экспериментов по подбору и оптимизации структуры композита, обеспечивающих эффективную совместную работу элементов гетерогенного материала, обеспечивающих рациональное управление свойствами конечного объекта городской инфраструктуры, с учетом требований к условиям эксплуатации.

Ключевые слова: строительные материалы, композиты, композиционные материалы, полиструктурная интеграция, полиструктурная теория бетона, бетон, вариотропная структура

Для цитирования:

Овчинников А.А., Обручев Д.В., Данилов И.Н. Композиционные материалы на основе полиструктурной интеграции гетерогенных систем. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 21-32 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_21



UDC 691.3

COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYSTRUCTURAL INTEGRATION OF HETEROGENEOUS SYSTEMS

A.A. Ovchinnikov¹, D.V. Obruchev², I.N. Danilov²

Alexander A. Ovchinnikov

¹Limited Liability Company "StroyKom", 2-nd Sovkhozny lane, 19, Ivanovo, 153023, Russia

E-mail: nisigasa@mail.ru

Dmitry V. Obruchev

²Limited Liability Company "Express-Partner", Vitebskaya st., 24, Ivanovo, 153029, Russia

E-mail: nisigasa@mail.ru

Igor N. Danilov

³Limited Liability Company "Express-Partner", Vitebskaya st., 24, Ivanovo, 153029, Russia

E-mail: nisigasa@mail.ru



The article aims to generalize the theoretical concepts of the dependence of the performance characteristics of composite materials on their composition and structure. The authors formulate the provisions on the influence of components on various structural levels of the composite in terms of the concrete polystructural theory. Also the article provides the possibility of high-quality control of the properties of materials and final objects of urban infrastructure based on them. The article analyzes the features of technological and design solutions for small architectural forms used to provide the conditions for improving the quality and comfort of the urban environment and participating in measures to improve the urban environment. Also we consider existing and promising options for using composite materials in the production of the urban environment objects. And carry out the main properties of composite materials deconstruction in terms of the levels of organization of the composite structure. We proposed the theoretical solutions for the integration of dissimilar materials into a single composite at various structural levels. The article presents the results of experiments on the selection and optimization of the structure of the composite. These provide the effective heterogeneous elements activity, which ensure the rational control the urban infrastructure final object properties, taking into account the operating conditions requirements.

Key words: building materials, composites, composite materials, polystructural integration, polystructural theory of concrete, concrete, variotropic structure

For citation:

Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Danilov I.N. Composite materials based on polystructural integration of heterogeneous systems. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 21-32 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_21



INTRODUCTION

The State Programme of the Russian Federation "Providing Affordable and Comfortable Housing and Communal Services to Citizens of the Russian Federation", approved by Resolution No. 1710 of the Government of the Russian Federation of 30 December 2017 [1] not only aims to provide affordable and comfortable housing and communal services to citizens of the Russian Federation. Also there is the Sub-Program 2 "Creating Conditions for Providing Quality Housing and Communal Services to Russian Citizens" requires forming comfortable urban environments. It aims to radical increase of the urban environment comfort, the quality index of the urban environment, reduce the number of cities with an unfavourable environment, provide the conditions for a systematic improvement of the quality and comfort of the urban environment through the implementation of a set of priority improvement measures, including the implementation of integrated beautification projects. In this context, the creation of urban environments and infrastructures that increase the comfort of human habitation and at the same time are designed to maintain their performance over the long term with minimum maintenance costs is of utmost importance.

This regard, the development of urban environments and infrastructure increases the human habitation comfort and at the same time designs to maintain their performance with minimal costs. The development of such materials is very important.

The scientific importance of the implemented approaches in the development of compositions and production technology of composites with improved performance properties consist in:

- complex use of methods of structural modification of composite systems by introduction of dispersed functional additives and polymeric component, providing directed formation of variotropic structure;
- methods for the bulk and surface transformation of polymer and fibre elements using promising types of physical and chemical action and peripheral layer generation to modify the reactivity of components in, thus converting components that are inert in their analogues into chemically active ones;
- methods for controlling the micro- and macroporosity parameters of the composite material by introducing a system of fatty acid esters and organomodified silicones, which ensures the composite's density properties can be adjusted within a wide range while maintaining its high strength properties;
- the technology for managing the adhesive interactions between the composite components and the mineral-polymer matrix, increasing the inclusion of the filler surface in the system by 50% more, compared to analogues;
- the control system of processes of three-dimensional self-organization of objects during formation and hardening, consisting in consistent provision of optimal conditions for the course of reactions in the formation of microstructure, and

directed mechanical influences, providing the formation of meso- and macrostructure of the composite.

The purpose of the study is to select and optimise the composite structure using the method of polystructural integration of heterogeneous materials for the manufacture of urban environment objects.

In order to achieve the goal, the following tasks were set and resolved in the work:

- 1) To analyse the design solutions of small architectural forms in order to be able to use composite materials for their production.
- 2) To develop material compositions for the polystructural integration of heterogeneous components into a single composite.
- 3) To study prototypes of the resulting composite materials.
- 4) To optimise the structure of composite materials and develop technology for the polystructural integration of heterogeneous composite materials for the manufacture of small architectural forms used in urban environments.

The presented scientific and engineering issues provide the production of heterogeneous composite material for the production of urban environment objects – small architectural forms, allowing to reduce operating costs by 40–60% and to increase the service life of such objects up to 25–30 years, while maintaining high technological efficiency of their production. The achievement of these goals allows us to develop and optimise the industrial technologies for the production of small architectural forms and other urban environment objects with high and stable properties, develop technical documentation, certify the product and act at the world market.

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF SMALL ARCHITECTURAL FORMS

In the Russian legal and normative system the components of the architectural environment are the elements of complex improvement, differentiated into the following types: landscaping; coverings; fencing; and small architectural forms. Small architectural forms (SAF) include: elements of monumental-decorative design, mobile and vertical landscaping design devices, water devices, urban furniture, utility and technical equipment of the city, as well as sports, lighting equipment, means of outdoor advertising and information. When designing and choosing small architectural forms, it is recommended to use catalogues of certified products. The small architectural forms should be designed individually for areas of historic buildings, the central core of the city and urban multifunctional centres [2]. Individual design objects have more free interpretation of the typology. For example, a seating area is not only a bench, but also a tiered platform, an amphitheatre and a module system [3, 4].

The design of a SAF structure, in terms of its aesthetic expression, is based on the technique of proportionality (from



the Latin "Proportio" - "ratio, proportionality of the parts") is a method of establishing the relationship between the parts of a form. The process of relating proportions of design is the first step to design the architecturally expressive highly artistic objects and small architectural forms. The right proportions produce new people's perception [5, 6]. Small proportions with a ratio between 1.0 and 1.618 are perceived by people as not causing aggression and tension. SAF with small proportions is perceived more harmoniously at close range due to its relatively small size.

In addition to artistic expression in the design of the SAF, the variability of their structure should be taken into account. This structure implies irregular properties across the cross-section of the product. It is the result of the specific requirements for the functional purpose, expression, and the using specific conditions of the SAF.

The surface of the SAF requires increased resistance to weathering, mechanical stress and UV radiation. At the same time, the SAF should retain its artistic expression and have pleasing organoleptic properties. There are micro- and macrolevels of SAF structure.

The macro level provides the cross-section properties change, which is structurally expressed by the integration of load-bearing layers made of a stronger material and decorative and protective or insulating layers that give the material its special properties.

Other way of integrating heterogeneous materials to produce a variatropic structure of the final product is to transit to

the meso- and micro-level, i.e. to combine heterogeneous elements in a quasi-monolithic material, which together give the composite new, unique properties.

By these features we have developed a method that combines options for integrating heterogeneous materials into a single composite on both macro-, meso- and micro-levels. But it depends on the type and purpose of the SAF. The technology combines macro- and mesostructure control by a rational combination of heterogeneous components to solve the problems of mass-size formation at the macro level, including the use of fixed components that work first as formwork forming elements and then as product components to reduce its average density, heat capacity and thermal conductivity. The rational combination of the particle size distribution of heterogeneous inert components and chemically active components at the meso level provides a three-dimensional co-programming of the system. At a micro level, the technology provides the formation of strength and hydrophobic properties of the composite and the product as a whole, through targeted control of hydration reactions of chemically active components and the introduction into the mineral body of the artificial stone of a polymerised three-dimensional reinforcing lattice formed by polymerising the copolymer.

The final SAF characteristics dependence on the properties of the composite at the micro, meso and macro level is shown in Table 1. Analysis of Table 1 shows that only a systematic approach to managing the structure of the composite at all levels, provides improved product using.

Table 1. Dependence of the main properties of composite materials in terms of the levels of organization structure

Composite structure level	Composite properties forming at the level	Properties of SAF
Micro level	Density	The bearing capacity of the product. Maintainability of the properties for a long time.
	Heat conductivity	Organoleptic comfort
	Hydrophobicity	The ability to resist penetration of moisture, solutions and aggressive media into the composite body, and as a consequence the stability of the product properties, increased frost resistance and water resistance.
Meso level	Friction resistance	The ability to resist mechanical abrasion during use as a long-lasting maintenance of the product's appearance without the need for additional painting.
	Linear deformations	The ability to keep linear and volumetric characteristics under changing temperature and humidity conditions as a long-lasting maintenance of the use of the product
	Crack resistance	The ability to support the crack growth and increased resistance to mechanical impact and shearing, both on the surface and in the volume.
Macro level	Density	Provides the product's mass dimensions within a rational range for the intended product use.
	Heat capacity	It decreases in heat capacity, and as a consequence provides comfortable organoleptic using.
	Durability	Thus, it provides guaranteed service life in urban environments by combining the components into a single system.



We identified the constructive principles for the integration of heterogeneous materials at the macro level, which have resulted in a variotropic structure of the final product. Further we implemented the ideas of managing the structure at all levels.

EXPERIMENTAL PART

The disadvantages of such traditional materials as metal, concrete, wood or plastic are the limited application possibilities and the relatively low resistance of much of the material to external aggressive influences. These classic materials do not integrate well with each other, which lead to a rapid loss of their functions, including decorative and aesthetics features of the product. To provide these features the urban environment objects should be made of the composites.

Composite materials are artificial, stone-like mixtures obtained by combining two or more heterogeneous elements. Their characteristic features are high physical and mechanical properties. They are not a sum of the properties of each individual component. The advantages of these materials are: high strength over a wide temperature range, chemical resistance, weathering and light fastness, resistance to wear and tear and durability as a rule.

The basic principles of mineral base modified by polymer additives composites production with a complex of improved physical-mechanical and operational properties are presented in works of Yu.M. Bazhenov [7], S.V. Fedosov, V.T. Erofeev, [8], V.I. Kalashnikov [9-11], etc. The main idea is the formation of mineral binders on a microlevel of low-base calcium hydrosilicates crystals by hardening. They compacted in a gel of hydrated initial binder components and new formations – the results of hydration of clinker minerals. This material has high physical and mechanical parameters, theoretically reaching values of 8–12 GPa, but due to the high defect structure resulting from its stochastic formation, the real strength of the composite is 90–120 MPa. It is difficult to use it directly because of its low cracking resistance, high thermal capacity and thermal conductivity, and relatively low resistance to aggressive environments.

To compensate for the disadvantages, the composite structure has traditionally been improved by the introduction of processing aids of various nature and purpose. Mineral sealing additives - fillers, both inert and chemically active are used to control the microstructure. Inert fillers become the centres of crystallisation and form the initial skeleton of the composite on a micro level. Chemically active fillers interact with the hydration products and bind products that can lead to undesirable processes, including corrosion. Other chemical-active components, such as rheological additives, are used to control the time, process and concentration of the mortar during the hydration.

We use the inert coarser fillers and fine aggregate of different nature at the meso level. We can obtain the less defective

structure with controlled average density by air regulating and by controlling the fractional composition and the ratio of the different filler and aggregate fractions of the binder. This level provides the composite's specified density, water and vapour diffusion, water absorption, friction as well as thermal characteristics.

We add the coarse aggregate, reinforcing cage and embedded elements into the composite to form the properties for the specific product and conditions at the macro level. The final characteristics of both the material and the product made from it are controlling the shape, dimensions and content of the macro components forms.

But mineral-binder composite is a capillary-porous body capable of sorbing solutions and gases from the environment and degrading under their influence. Its surface remains insufficiently tactile and has a low artistic expression. Thus, we proposed and implemented measures to compensate these disadvantages.

We used White Portland cement 2-400-D0-GOST-965-89 and 1-500-D0-GOST 965-89 as the main binder. Its characteristics were regard to GOST 310.1 - GOST 310.4. The fineness of the cement was 4500–5000 cm²/g, normal density 23–26%, setting time – the beginning not earlier than 40 minutes and the end not later than 10 hours, activity 49.0–52.5 MPa.

We use sealing and hydrophobic additives, such as microcalcite KM80 GOST R 56775-2015 and zinc stearate TU 6-09-17-316-96 to provide low water and vapour permeability and low water absorption.

To control rheological properties, we used hardening accelerator - calcium nitrate, setting retarder - nitrilotriethylphosphonic acid (NTPh) TU 2439-347-05763441-2001, hyperplasticizer PC-40 TU 5745-005-13453677-2008. All additives meet GOST 24211-2008.

We used the various fractions quartz sand for the glass industry GOST 22551-2019 as a fine aggregate.

Mixture parameters are determined by GOST 10181-2014, strength of samples by GOST 18105-2018 and GOST 10180-2012, abrasion by GOST 13087-2018, density by GOST 12730.1-2020, porosity by GOST 12730.4-2010, water absorption by GOST 12730.3-2020, heat capacity by GOST 23250-78, thermal conductivity by GOST 7076-99, linear expansion by GOST 30459-2008. The selection of compositions was by GOST 27006-2019.

The structure of the developed composite material should contain such a concentration of fillers, which is rationally and physically justified. Also, they should correspond to the amount of the binder, which predetermines the speed of chemical reactions. This allows to see the regularities for the mutual arrangement of binder, filler and fine aggregate particles. This provides the following conditions:

- we achieve a conditional optimum filler concentration and an optimum system packaging at the final stage of structure formation.



- we reduce the nucleation energy of the crystals due to the presence of the filler crystallisation centres.
- we reduce the surface tension at the crystal-liquid interface through the use of various processing aids. The nucleation rate of the new phase is increased.
- the resulting composite contains oversized particles - a fine aggregate designed to compensate for the internal stresses generated by high filler concentration.
- mechanical action on the filler phase provides maximum contact strength between the particles.

- the use of surface-active additives provides the change of the cement rheology, including polycarboxylate-type hyperplasticisers.

- the filler, provides maximum adhesion between the binder and the aggregate and consequently maximum strength and minimum hollowness, by displacing the binder into the contact zone at the macro level.

Table 2 presents the summary of the technological solutions adopted for shaping the composite properties.

Table 2. Technological decisions by selecting the composition

Composite structure level	Composite properties at the level	Technological decision by selecting the composition
Micro level	Density	The use of high-strength hydraulic binder White Portland cement CEM 1B provides a composite strength of up to 60 MPa.
	Heat conductivity	We reduce the thermal conductivity by using a finely ground filler. It forms a three-dimensional bulk grid of low thermal conductivity at the micro level, displacing the highly conductive water and forming the insulating interlayers between the composite components.
	Hydrophobicity	The use of a sealing additive - microcalcite KM 80 and a hydrophobic additive - zinc stearate, provides a reduction of water absorption below 2.5%
Meso level	Friction resistance	The use of high-quality White Portland cement CEM 1B together with polycarboxylate hyperplasticiser PC-40 provides a hard dense product surface
	Linear deformations	Application of discrete, grain-optimised aggregate
	Crack resistance	Use of micro-calcite as a filler, together with re-dispersible powder and hyperplasticiser
Macro level	Density	Use of large dimensioned fixed elements for the formation of macrostructure, playing the role of forming element, permanent formwork and coarse aggregate at different stages of the technology
	Heat capacity	Application of large-sized non-removable elements with low heat capacity for the formation of macrostructures
	Durability	Integration of individual heterogeneous elements into a single composite

The composite mixture has colloidal-sized particles and larger particles, due to a discrete filler grain composition of 0.1 mm or less. The electrolyte is a calcium nitrate hardening accelerator. The polycarboxylate hyperplasticiser PC-40 regulates the rheological properties of the mixture and influences the crystallisation process of low-base calcium hydro-silicates.

The methods for calculating the composition consist in establishing the volumes of inert and filler fractions, taking into account the coating of grains. But the amount of fine fraction

is calculated by the displacement of the binder from the intergranular voids. Thus, the aggregate with the lowest porosity will be the most rational fractional composition.

The purpose of applying the mixture is to make SAF elements. They are not very thick. The maximum aggregate grain size should be less than 1/4 of the thickness of SAF element, the maximum aggregate grain size will be 5.0-2.5 mm. A composite similar to fine-grained concrete will be the result.



During the experiments it was found that the introduction of sufficiently fine sand of continuous fraction with fineness modulus 1.5-1.3 into the binder when the mass ratio of cement: sand exceeds 1: 1.5, leads to a sharp decrease of strength (Fig. 1).

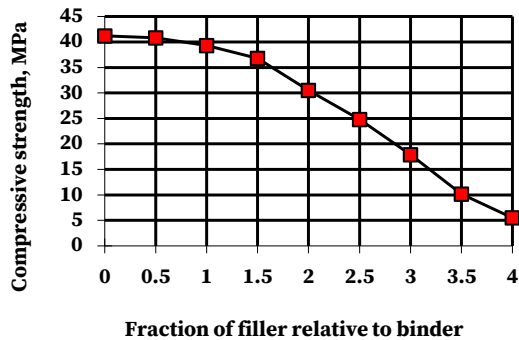


Fig. 1. The dependence of composite strength on the amount of filler

The shape of the fine filler grains plays a significant role in this process. Sand obtained by crushing or sieving is irregularly shaped grains, so the total porosity of the mixture reaches 25-28%. Indirectly, the value of the porosity can be determined by the bulk density – the higher the filler bulk density, the denser the mixture and therefore the lower the

porosity. Thus, a denser mixture of fine filler fractions will require less cement to produce a composite. Fig. 2 shows the results of the experiment to identify the dependence of the bulk density on the amount of finer fraction.

Fig. 2 analysis shows the maximum bulk density lies within the range of fine fraction consumption of 20-40%, the finer fraction most effectively fills the inter-grain voids, so a mixture including both coarse and fine fractions has a higher density. Andersen [12], Fuller and S.R. Zamyatin [13] laid the theoretical background and basic laws of formation of properties for mixtures with continuous filler fraction compositions. P.I. Bozhenov [14] and L.I. Dvorkin [15] identified ratios between coarse and fine fractions for fractional mixtures.

The most effective is a discrete particle size distribution of the mixture. The real filler grains are not perfect, so the fraction-to-fraction transition factor proposed by L.I. Dvorkin [16] becomes ineffective. Thus, the most appropriate transition coefficient is the value suggested by P.I. Bozhenov - 0.255 [14]. The average sand fraction size of 2.5 to 5.0 corresponds to 3.75 mm, the next fraction should be $3.75 \cdot 0.255 = 0.956$ mm, which corresponds to a fraction of 1.25-0.63 mm. By the Fuller equation the amount of this fraction is 44-46%. The following fraction is required to increase packing density. Calculating the size of the new fraction by analogy, we obtain a fraction of 0.315-0.14 mm. The amount of component will be 24% of the weight of the medium fraction. The porosity will be 29%. Thus, the ratio of the fractions in the mixture would be: 9:4:1 by mass, for fractions 5.0-2.5, 1.25-0.63, 0.315-0.14.

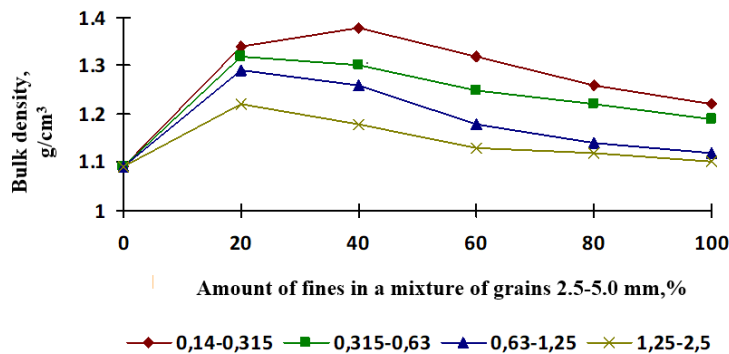


Fig. 2. Dependence of filler bulk density on the mixture particle size distribution

Effective production requires a high level of mobility to provide complete filling of the mould, before the surface self-levels and the entrapped air is released. Fig. 3 shows the flowability dependence of the mixture by the Suttard viscometer for the composition with optimised particle size distribution. The polycarboxylate hyperplasticiser has a higher efficiency than the traditional phenol-formaldehyde-based plasticiser at equal costs per mass of binder.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The presented principles for determining the structure of the composite consist of selecting the ratio of the amount of binder to the volume of optimised filler. The maximum strength of the composite material provides its high mobility. By a grain coating thickness of 0.05-0.06 mm, the filler volume ratio will be 2. The results are shown in Table 3.

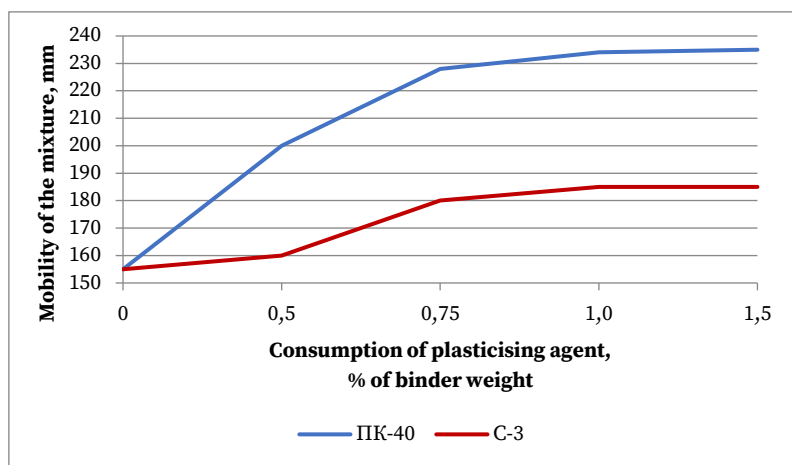


Fig. 3. The dependence of the mobility of the concrete mixture on the consumption of the plasticizing additive

Table 3. The dependence of the strength of the composite on the consumption of components and the activity of cement

Cement, kg	Filler, kg	Optimised filler, kg	Density at CEM 1 42.5, MPa	Density at CEM 1 42.5, MPa
250	125	1725	12.0	15.2
300	150	1650	13.8	17.5
350	175	1575	15.8	19.9
400	200	1500	24.2	30.4
450	225	1425	30.5	35.6
500	250	1350	35.8	41.9
550	275	1275	38.2	46.8
600	300	1200	40.1	49.1

We can see a non-linear increase in strength with increasing cement consumption, with a slowing down of the growth during the complete matrix saturation phase on Table 3. A further increase in the binder consumption does not lead to an increase in strength, as the maximum possible strength for the cement grade has been reached. The strength parameters of the composite provide the requirements of SP 63.13330.2012 "Concrete and reinforced concrete structures" and correspond to the strength class B35-B40 for fine-grained concretes of natural solidification.

CONCLUSIONS

Thus, in our study we identified the basic structural parameters for obtaining a new type of composite material, combining the properties of polymer and mineral-based composites, characterised by high strength, low crack resistance, low heat capacity and thermal conductivity. The new material, unlike traditional materials, can have a variotropic structure. It will allow to form the properties of products for different directions. Also, this will provide the product with unique structural, thermal and aesthetic properties, high consumer

qualities and will make it possible to use it in urban environment and infrastructure objects. Integration of mineral components will allow the material to resist effectively to external aggressive influences, having increased terms of nonrepair operation of products in 2-3 times in comparison with traditional. That will lead to considerable decrease in expenses for maintenance of a normative condition of products from the developed composite material.

This gives a composite with a density of 2.1 g/cm³, a compressive strength of 46–49 N/mm², an abrasion resistance of 0.55 g/cm², a linear expansion coefficient of 0.52 mm/m, a heat capacity of 1.14 kJ/(kg · °C) and a thermal conductivity of 0.65 W/(m · °C). The achieved characteristics of the composite material are sufficient for products exposed to alternating wetting-drying, freezing-thawing, abrasion and mechanical stress. The resulting properties meet the requirements of structural concrete for products over 100 years of age.



ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства РФ от 30 декабря 2017 г. N 1710 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями)
2. МГСН 1.02-02/ТСН 30-307-2002. Нормы и правила проектирования комплексного благоустройства на территории города Москвы (с изменениями от 19 августа 2003 г. 11 июля 2006 г.).
3. **Силкина М.А.** Визуальные ориентиры в архитектурной среде. *Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ: Тезисы докладов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов.* М.: МАРХИ. 2015. С. 417-418.
4. **Силкина М.А.** Визуальные ориентиры в архитектурной среде. *Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ: Тезисы докладов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов.* М.: МАРХИ. 2015. С. 417-418.
5. **Силкина М.А.** Методические указания по выполнению курсового проекта «Система малых архитектурных форм и оборудования для средовой ситуации» по дисциплине «Архитектурно-дизайнерское проектирование». М.: МАРХИ. 2015. 18 с.
6. **Скुरатовский Г.М.** Искусство архитектурного пропорционирования. Новосибирск: «Наука» Сибирское предприятие РАН. 1997. 184 с.
7. **Королев Е.В., Баженов Ю.М., Смирнов В.А.** Строительные материалы вариатропно-каркасной структуры. Монография. М.: МГСУ. 2011. 316 с.
8. **Баженов Ю.М., Федосов С.В., Ерофеев, В.Т.** Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения. Монография. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та. 2011. 126 с.
9. **Саденко Д.С., Калашников В.И., Вечкасов А.В.** Малоцементные конструкционные бетоны с реакционно-активным диатомитом армированные хризотилом. Монография. Пенза: ПГУАС. 2016. 119 с.
10. **Калашников В.И., Тараканов О.В.** О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения. *Строительные материалы.* 2017. № 1-2. С. 62-67.
11. **Калашников В.И.** Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов, бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов. *Строительные материалы.* 2016. № 1-2. С. 96-103.
12. **Будников П.П., Полубояринов Д.Н.** Химическая технология керамики и огнеупоров. Справочник. М.: Стройиздат. 1972. 260 с.
13. **Замятин С.Р., Пургин А.К.** Огнеупорные бетоны. Справочник. М.: Металлургия. 1982. 192 с.
14. **Боженев П.И.** О формировании технических характеристик полидисперсных искусственных материалов. *Строительные материалы.* 1992. № 4. С. 20-24.
15. **Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М.** Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Монография. Киев: Будівельник. 1991. 136 с.
16. **Дворкин Л.И.** Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах. *Изв. вузов. Строительство и архитектура.* 1988. № 9. С. 53-57.

Поступила в редакцию 20.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation of December 30, 2017 N 1710 "On approval of the state program of the Russian Federation" Provision of affordable and comfortable housing and utilities for citizens of the Russian Federation "(with amendments and additions) (in Russian).
2. MGSN 1.02-02 / TSN 30-307-2002 Norms and rules for the design of integrated landscaping in the city of Moscow (as amended on August 19, 2003. July 11, 2006) (in Russian).
3. **Silkina M.A.** Visual landmarks in the architectural environment. *Nauka, obrazovaniye i eksperimentalnoye proyektirovaniye v MARKhI. Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatelskogo sostava. molodykh uchenykh i studentov.* М.: MARKHI. 2015. P. 417-418 (in Russian).
4. **Silkina M.A.** Visual landmarks in the architectural. *Nauka, obrazovaniye i eksperimentalnoye proyektirovaniye v MARKhI. Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatelskogo sostava. molodykh uchenykh i studentov.* М.: MARKHI. 2015. P. 417-418 (in Russian).
5. **Silkina M.A.** Methodological instructions for the implementation of the course project "System of small architectural forms and equipment for the environment" in the discipline "Architecture and design". М.: MARKHI. 2015. 18 p. (in Russian).
6. **Skuratovsky G.M.** The art of architectural proportioning. Novosibirsk: «Nauka» Sibirskoye predpriyatiye RAN. 1997. 184 p. (in Russian).
7. **Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Smirnov V.A.** Building materials of variotropic-frame structure. М.: MGSU. 2011. 316 p. (in Russian).
8. **Bazhenov Y.M., Fedosov S.V., Erofeev V.T.** Cement composites based on magnetically and electrochemically activated mixing water. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta. 2011. 126 p. (in Russian).
9. **Sadenko D.S., Kalashnikov V.I., Vechkasov A.V.** Low-cement structural concretes with reactive diatomite



- reinforced with chrysotile. Penza: PGUAS. 2016. 119 p. (in Russian).
10. **Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V.** On the use of complex additives in new generation concretes. *Stroitelnyye materialy*. 2017. N 1-2. P. 62-67 (in Russian).
 11. **Kalashnikov V.I.** Evolution of the development of compositions and changes in the strength of concrete. concretes of the present and future. Part 1. Changing the composition and strength of concrete. *Stroitelnyye materialy*. 2016. N 1-2. P. 96-103 (in Russian).
 12. **Budnikov P.P., Poluboyarinov D.N.** Chemical technology of ceramics and refractories. Guide. M.: Stroyizdat. 1972. 260 p. (in Russian).
 13. **Zamyatin S.R., Purgin A.K.** Refractory concrete. Guide. M.: Metallurgiya. 1982. 192 p. (in Russian).
 14. **Bozhenov P.I.** On the formation of technical characteristics of polydispersion artificial materials. *Stroitelnyye materialy*. 1992. N 4. P. 20-24 (in Russian).
 15. **Dvorkin L.I., Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Chudnovsky S.M.** Cement concretes with mineral fillers. Kiev: Budivelnik. 1991. 136 p. (in Russian).
 16. **Dvorkin L.I.** Effect of active fillers in plasticized cement concretes. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura*. 1988. N 9. P. 53-57 (in Russian).

Received 20.09.2021

Accepted 20.09.2021



УДК 620.171.2:678.01

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

**А.Н. Блазнов^{1,2}, В.Б. Маркин³, В.Ф. Савин⁴, В.В. Фирсов¹,
А.А. Генина², Е.Г. Сакошев²**

Алексей Николаевич Блазнов

¹Лаборатория материаловедения минерального сырья, институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659322

²Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: blaznov74@mail.ru

Виктор Борисович Маркин

³Кафедра современных специальных материалов, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, Алтайский край, Российская Федерация, 656038

E-mail: mvb1942@mail.ru

Владимир Федорович Савин

⁴ООО «Бийский завод стеклопластиков», ул. Ленинградская, 60/1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659316

Вячеслав Викторович Фирсов

¹Лаборатория материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659322

E-mail: labmineral@mail.ru

Анастасия Александровна Генина

²Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: genina.an@gmail.com

Егор Германович Сакошев

²Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: fak1_00@mail.ru



На примере исследования долговечности образцов стеклопластиковой арматуры под действием постоянной изгибающей нагрузки при температуре минус 30 °С продемонстрирован метод длительных испытаний строительных композитов и статистическая обработка результатов. Предложены устройства длительных испытаний на продольный изгиб, позволяющие нагружать одновременно по 20 образцов. Полученные экспериментально законы распределения образцов по прочности соответствуют нормальному, по долговечности – логарифмически-нормальному распределению. Даны рекомендации по обоснованному выбору постоянно действующей нагрузки по результатам определения прочности, позволяющей получить разрушение большей части образцов за срок эксперимента до трех месяцев. Предложен алгоритм проведения длительных испытаний и способ совместной математической обработки статистических результатов прочности и долговечности для построения силовых зависимостей. Приведены результаты длительных испытаний образцов стеклопластиковой арматуры в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С. С помощью предложенного метода получены зависимости, которые позволяют спрогнозировать значение длительной прочности 0,6 для долговечности 100 лет. Полученные результаты соответствуют литературным данным других авторов.

Ключевые слова: стеклопластиковая арматура, длительная прочность, долговечность, метод испытаний, статистическая обработка результатов, закон распределения

Для цитирования:

Блазнов А.Н., Маркин В.Б., Савин В.Ф., Фирсов В.В., Генина А.А., Сакошев Е.Г. Метод исследования долговечности стеклопластиковой строительной арматуры. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 32-45 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_32



УДК 620.171.2:678.01

THE METHOD OF STUDYING THE DURABILITY OF FIBERGLASS CONSTRUCTION REINFORCEMENT

**A.N. Blaznov^{1,2}, V.B. Markin³, V.F. Savin⁴, V.V. Firsov⁵,
A.A. Genina², E.G. Sakoshev²**

Aleksei N. Blaznov

¹Laboratory of Mineral Materials Science, Institute of Chemical and Energy Technology Problems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Socialisticheskaya st., 1, Biysk, Altai Region, 659322, Russia

²Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: blaznov74@mail.ru

Viktor B. Markin

³Department of Current Specialty Materials at the Polzunov Altai State Technical University; ave. Lenina, 46, Barnaul, Altai Region, 656038, Russia

E-mail: mvb1942@mail.ru

Vladimir F. Savin

⁴OOO Biysk Factory of Fiberglass-Reinforced Plastics; Leningradskaya st., 60/1, Biysk, Altai Region, 659316, Russia

Vyacheslav V. Firsov

¹Laboratory for Materials Science and Mineral Raw Materials at the Institute for Problems of Chemical and Energetic technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS); Socialisticheskaya st., 1, Biysk, Altai Region, 659322, Russia

E-mail: labmineral@mail.ru

Anastasia A. Genina

²Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: genina.an@gmail.com

Egor G. Sakoshev

²Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: fak1_00@mail.ru



We demonstrate methods for long-term testing of construction composites and statistical processing through examining the durability of the fiberglass-reinforced bar specimens under continuous flexural load at -30°C. Prolonged flexural test apparatuses allow to load by 20 samples simultaneously. The strength laws of the experimentally obtained sample distributions correspond to a normal distribution, while the durability laws correspond to a logarithmic-normal distribution. Guidelines are given on the reasonable choice of a permanent load based on a strength determination that would result in the destruction of most of the samples over a period of up to three months. The invention relates to an algorithm for conducting long-term tests and to a method for mathematically co-processing statistical results of strength and durability for generating power relationships. The results of the long-term tests of fiberglass-reinforced bar samples are given in the range of temperatures from minus 30 to plus 50°C. The proposed method produces relationships and makes it possible to predict a value of a lasting strength of 0.6 for a durability of 100 years. Using the suggested method, relationships have been derived that can predict a long-term strength of 0.6 for durability of 100 years. The results are in accordance with the studies of the other authors.

Key words: fiberglass-reinforced bar, long-time strength, durability, test method, statistical data processing, distribution law

For citation:

Blaznov A.N., Markin V.B., Savin V.F., Firsov V.V., Genina A.A., Sakoshev E.G. The method of studying the durability of fiberglass construction reinforcement. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 32-45 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_32



ВВЕДЕНИЕ

Длительная прочность и долговечность являются важнейшими характеристиками любого конструкционного материала. Особое внимание уделяется этим эксплуатационным свойствам для изделий, используемых в ответственных строительных конструкциях, таких как жилые дома [1]. Примером длительного использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в строительстве могут служить гибкие связи стекло- и базальтопластиковой арматуры и композитные стержни периодического профиля [1, 2], которые подвергаются воздействию нагрузки и температуры в течение всего срока эксплуатации (от 50 до 100 лет). Поскольку механические свойства, в том числе и длительная прочность ПКМ, сильно зависят от технологии их изготовления и состава, возникает необходимость проведения исследовательских, типовых и периодических испытаний выпускаемых изделий на длительную прочность и долговечность.

В настоящей работе речь идет о «механической» долговечности, когда на изделие в процессе эксплуатации воздействуют только постоянная нагрузка и постоянная температура, и не учитываются другие воздействующие факторы, такие как химическое старение, суточные и сезонные циклы температуры, влажность, ультрафиолет [3].

Определения терминов «долговечность» и «длительная прочность» приняты в соответствии с [4]: *долговечность* – время, прошедшее с момента приложения к образцу материала не изменяющейся механической нагрузки до момента его разрушения; *длительная прочность* – не изменяющаяся по величине механическая нагрузка, приложенная к образцу материала и вызывающая его разрушение за заданный промежуток времени.

Силовая зависимость долговечности – зависимость времени τ до разрушения от приложенной постоянной по величине нагрузки, характеризуемой напряжением σ , – была четко установлена на силикатных стеклах [5-8]. Для силикатных стекол было предложено несколько эмпирических формул, из которых наибольшее распространение получила формула Голланда и Тернера или степенной закон:

$$\tau = B \cdot \sigma^{-b}, \quad (1)$$

где τ – долговечность; σ – заданное растягивающее напряжение; B и b – константы.

В ходе исследования процессов разрушения твердых тел сложилось два подхода к объяснению этого сложного явления. Один из них – теория разрушения Гриффитса-Ирвина – рассматривает разрушение, как прорастание макротрещины из наиболее опасного дефекта через поврежденный материал. Она приводит к линейной механике разрушения. Эта теория, созданная для однофазных материалов, не всегда применима к ПКМ, проявляющим неоднородность на масштабном уровне,

сравнимом с размерами трещины, поскольку предполагает ее прямолинейное распространение [1, 6].

По мере накопления результатов исследования длительной прочности материалов концепция, рассматривающая разрушение как протекающий во времени процесс, пришла на смену представлениям о разрушении, как критическом событии (единичном акте), наступающем при достижении предельного напряжения [6, 9].

Исследования разрушения в условиях статического нагружения, проведенные зарубежными и отечественными учеными, привели к господству кинетических представлений о прочности материалов [10-12]. Развивается новый раздел механики твердых тел – кинетическая механика разрушения. Наиболее значимые работы выполнены в лаборатории физики прочности физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР в начале 1950-х годов С.Н. Журковым и сотрудниками. Независимо друг от друга Ф. Буше [13] и С.Н. Журковым была установлена эмпирическая зависимость, которая получила название формулы Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right) \quad (2)$$

где τ_0 – постоянная времени (для стеклопластиков 10^{-13} с), U_0 – энергия активации процесса разрушения; γ – структурно чувствительный параметр, достигающий 10^{-10} атомных объемов; σ – постоянное приложенное напряжение; $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Сотрудниками института им. А.Ф. Иоффе АН СССР во главе с С.Н. Журковым [10-12] было установлено, что прямые долговечности в координатах $\ln \tau - 1/T$ при различных значениях σ сходятся в одной точке и у разных пластмасс абсцисса полюса находится в различных местах. Для объяснения этого факта С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев в работах [14, 15] предложили следующее обобщение уравнения С.Н. Журкова:

$$\tau = \tau_m e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right)}, \quad (3)$$

где τ_m – минимальная долговечность материала, отвечающая максимально допустимой температуре T_m , при которой при любой нагрузке или без нее материал размягчается вследствие интенсивного разрыва межмолекулярных связей или разрушается в результате деструкции т. е. разрыва межатомных связей.

В работе [15] Ратнер С.Б. проводит критический анализ множества выражений для расчета долговечности полимеров. Некоторые результаты и выводы названы ошибочными. Показано, что способ обработки по различным выражениям экспериментальных данных позволяет получить существенно различающиеся результаты. Отличия в результатах автор работы [13] обосновывает непостоянством параметров τ_0 ; γ и U_0 в формуле Журкова, и их зависимостью от температуры. Ратнер С.Б. предлагает на основании формулы (3) принцип температурно-



временной-силовой эквивалентности, согласно которому любой из предельных показателей механической работоспособности (σ , T и τ) может быть повышен за счет понижения любого другого показателя или их комбинации. Исходя из этого, чтобы обеспечить рост предельного показателя механической работоспособности модифицированных пластических масс следует повышать константы U_0 , T_m и τ_m и понижать γ .

Из формулы (3) следует, что растягивающее напряжение σ , вызывающее критическое событие – разрушение ("предел" прочности) или деформирование ("предел" вынужденной эластичности или "текучести") [13], можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[U_0 - \frac{RT}{1 - T/T_m} \ln \frac{\tau}{\tau_m} \right]. \quad (4)$$

Понятие "предел" означает, что указанные предельные состояния могут быть достигнуты при любом напряжении и уменьшаются с ростом температуры T и времени ее действия τ . Аналогичный вывод следует и для "предельной" температуры работоспособности - теплостойкости при размягчении и термодеструкции при разрушении. Из формулы (3) или (4) следует [13]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_m} + \frac{U_0 - \gamma\sigma}{R \ln \tau / \tau_m}. \quad (5)$$

Существует большой класс ПКМ, долговечность которых не удастся описать формулой С.Н. Журкова. Для этого класса Г.М. Бартнев [7] предложил следующее выражение:

$$\tau = C \cdot \sigma \cdot b \cdot \exp(U/RT). \quad (6)$$

Авторы работы [8] делают вывод о том, что при сохранении кинетической природы прочности формула Журкова справедлива только в тех случаях, когда зависимость между напряжением и деформацией линейна, соответствует закону Гука.

$$\tau = n \cdot \exp\left(-\frac{T - T_0}{B}\right) \cdot \frac{(1 - \phi_A) \cdot E_M + \phi_A \cdot E_A}{(1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A} \times \ln \frac{(E_M - H_M) \cdot E_A \cdot (1 - \phi_A) \cdot F}{[(1 - \phi_A) \cdot E_A \cdot F - \varepsilon \cdot E_A \cdot A \cdot ((1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A)] \cdot [(1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A]} \quad (7)$$

где n , B – коэффициенты, F – постоянная нагрузка, A – площадь поперечного сечения, H_m – модуль длительной упругости матрицы.

По экспериментальным данным работы [5] для однонаправленно армированного стеклопластика на основе полиэфирного связующего оценка длительной прочности дает значение $\sigma_\infty \sim 410$ МПа, что составляет около 0,65 от величины временной прочности. Таким образом, рис. 1 наглядно демонстрирует влияние метода обработки экспериментальных данных по долговечности на результат. В области времени от τ_1 до τ_2 (см. рис. 1), доступного для эксперимента, различные теории дают близкие значения, но существенно расходятся в области низких

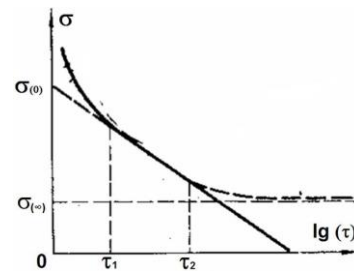


Рис. 1. Зависимость длительной прочности от долговечности по данным работы [5]:

сплошная – по формуле (1), пунктирная – по выражению (7)

Fig. 1. The dependence of long-term strength on durability according to the data of [5]:

solid – according to the formula (1), dotted – according to the expression (7)

Установлено также, что в определенном интервале времени до разрушения, доступном для эксперимента, связь между длительной прочностью σ и $\lg(\tau)$ или $\ln(\tau)$ имеет линейный характер (рис. 1), что соответствует выражению (1). При более длительных опытах и повышенных температурах наблюдается перелом на диаграмме $\sigma - \ln(\tau)$ [16], что, по мнению авторов работы [5], свидетельствует о существовании предела длительной прочности σ_∞ – такого максимального напряжения, ниже которого материал не будет разрушаться сколь угодно долго (рис. 1).

На основе феноменологических представлений А.М. Скудра и Ф.Я. Булавс предложили следующую эмпирическую зависимость для описания долговечности стеклопластиков [5]:

напряжений при долговечности 50 и 100 лет, что как раз и представляет наибольший интерес для изучения эксплуатационных свойств материала.

Исследователями отмечены высокие разбросы долговечности ПКМ при одном уровне нагрузок, что препятствует постановке прямого эксперимента на длительный срок. Кроме того, старение материалов в процессе длительных испытаний может произойти от действия окружающей среды, физико-химических превращений в самом материале и других факторов [3], не имеющих прямого отношения к «механической» долговечности, т.е. изменения свойств под действием только нагрузки.



Целью данной работы являются экспериментальные исследования долговечности стеклопластиковых стержней, применяемых в строительстве, с помощью оригинального метода, основанного на статистической обработке результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве образцов для исследований использовали стержни стеклопластиковой арматуры номинальным диаметром 5,5 мм (СПА-5,5), серийно изготавливаемой по ТУ 2296-001-20994511.

Сущность метода длительных испытаний и обработки результатов состоит в следующем:

- испытывают представительную выборку образцов одним из методов статических испытаний (на растяжение, сжатие или изгиб);
- определяют допустимое значение длительно действующего напряжения по минимальным значениям прочности в первой группе образцов с таким расчетом,

чтобы, с одной стороны, напряжение не оказалось слишком высоким, при котором разрушится большая часть образцов, предназначенных для длительных испытаний, и, с другой стороны, не оказалось слишком низким, при котором не разрушится ни один образец в выборке;

- нагружают выбранной величиной длительно действующего напряжения все образцы, предназначенные для длительных испытаний тем же методом (растяжение, сжатие либо изгиб), и измеряют долговечность – время, прошедшее с момента нагружения до момента разрушения образцов.

По предварительным экспериментальным данным [6, 9], распределение прочности стеклопластиков соответствует нормальному закону. На рис. 2 приведены результаты испытаний на продольный изгиб представительной выборки образцов от трехсерийных партий стеклопластиковых стержней СПА-5,5 по ТУ 2296-001-20994511. По данным рис. 2 можно отметить, что закон распределения стержней по прочности соответствует нормальному с высоким коэффициентом корреляции $R^2=0,98-0,99$.

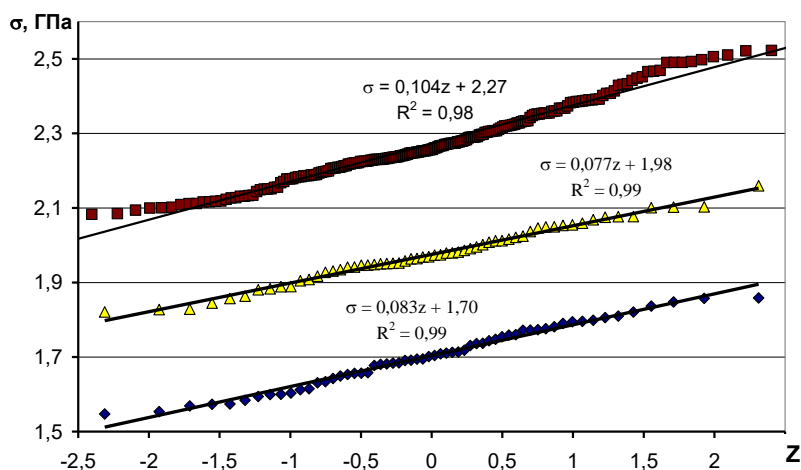


Рис. 2. Распределение образцов СПА-5,5 от трех партий по прочности
Fig. 2. Distribution of SPA-5.5 samples from three batches by strength

Приведем пример реализации метода длительных испытаний и обработки результатов на конкретных изделиях из стеклопластика.

Выбор температур для испытаний был обусловлен следующими обстоятельствами. Допустимый диапазон хранения и эксплуатации стеклопластиковой арматуры по ТУ 2296-001-20994511 от минус 60 до плюс 50 °С, соответствует климатическим зонам РФ. Температурная зависимость прочности исследовалась во всем диапазоне температур и приведена в работах [17, 18], из которых следует, что прочность и деформативность стеклопластика с понижением температуры возрастает, а с повышением – уменьшается. Это еще одно полезное свойство композитов, в отличие от сталей – не происходит

охрупчивания вплоть до заморозки в жидком азоте [19]. Для стальных изделий известны случаи хрупкого излома при низких температурах, приводившие к авариям на строительных объектах.

Поскольку предварительно было установлено повышение механических свойств стеклопластиков в области отрицательных температур, длительные испытания были ограничены имеющимся оборудованием – промышленной холодильной камерой, способной поддерживать постоянную температуру минус 30 °С в течение всего эксперимента. Верхний температурный диапазон эксплуатации композитов ограничен температурой начала перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние, которое для исследуемых



стеклопластиков составляет не менее 75–80 °С, поэтому повышенная температура длительных испытаний была выбрана 50 °С, соответствующая стеклообразному состоянию связующего и максимальной температуре эксплуатации по климатическим зонам РФ.

Выбор метода испытаний на продольный изгиб был обусловлен его достоинствами [17], важнейшими из которых являются: отсутствие воздействия металлических частей (отсутствие контактных напряжений) в месте наибольшего прогиба образца; комплексная нагрузка одновременно внутренних слоев на сжатие, наружных – на растяжение; простота метода – возможность проведения одновременно массовых испытаний при малых габаритах устройств и малых значениях усилий (сила потери устойчивости при продольном изгибе примерно в 50 раз меньше силы, необходимой для растяжения/сжатия образца того же сечения); при продольном изгибе стеклопластиковый образец имеет упругие деформации и работает подобно пружине – консервирует нагрузку на длительное время, практически отсутствует релаксация, и образец разрушается в средней части при достижении предельной долговечности вследствие запасенной энергии упругой «пружины».

В табл. 1 приведены данные по результатам измерения прочности исследуемой партии СПА-5,5 на продольный изгиб [17, 20] при температуре минус 30 °С.

Алгоритм обработки экспериментальных данных следующий.

Все полученные результаты определения прочности стержней располагают в порядке возрастания, присваивая каждому образцу порядковый номер i .

Для каждого образца рассчитывают значения вероятности P по формуле [21]:

$$P(i)=i/(n+1), \quad (8)$$

где i – порядковый номер образца в упорядоченном массиве; n – количество образцов.

По полученным результатам находят значения табличной функции Z обратного нормального распределения с помощью статистических таблиц, например, в программе Excel. Полученные данные сведены в табл. 1.

По данным табл. 1 строят графическую зависимость $\sigma_b(i)=f(Z(i))$ (рис. 3). Как показано на рис. 2 и 3, исследуемые образцы стеклопластиков по прочности удовлетворяют нормальному закону, с высоким коэффициентом корреляции. Зависимость прочности от нормированной функции обратного нормального распределения (по данным рис. 3) описывается линейным законом:

$$\sigma_b = b_\sigma \cdot (Z) + a_\sigma, \quad (9)$$

где b_σ , a_σ – эмпирические коэффициенты, в рассматриваемом примере равны $b_\sigma=93,107$ МПа (определяет угол наклона аппроксимирующей прямой); $a_\sigma=2055$ МПа (определяет среднее арифметическое значение прочности в выборке).

В табл. 1 приведены расчетные значения прочности по выражению (9) и величина относительного отклонения экспериментальных данных от расчетных. Погрешность не превышает $\pm 1\%$, что говорит о высоком соответствии расчетных и экспериментальных данных.

Выбор величины постоянно действующей нагрузки имеет решающее значение для испытаний на долговечность. Эта нагрузка не должна быть слишком высокой, вызывающей преждевременное разрушение большей части образцов, но также и не должна быть слишком низкой, при которой не разрушится ни один образец за разумное время эксперимента. Достаточно получить гарантированное разрушение половины образцов в выборке за время эксперимента для статистической обработки результатов.

Из опыта испытаний на долговечность, для получения разрушения образцов при длительности экспериментов до трех месяцев можно рекомендовать значение длительно действующего напряжения, определяемое по минимальному значению прочности образцов в выборке при вероятности разрушения $P = 2,4\%$.

Величину $\sigma_{b(0,024)}$ определяют по выражению (9), подставляя значение $Z = -1,97$.

Величину длительно действующего постоянного напряжения определяют по выражению

$$\sigma_\tau = K \cdot \sigma_{b(0,024)}, \quad (10)$$

где K – эмпирический коэффициент, принимаемый 0,89–0,92 [9].

В рассматриваемом примере расчетная величина $\sigma_{b(0,024)} = 1872$ МПа.

Длительное напряжение изначально было подобрано эмпирически и составило $\sigma_\tau = 1727$ МПа, при этом коэффициент $K = 0,923$.

На величину напряжения $\sigma_\tau = 1727$ МПа были загружены все образцы второй группы от той же партии, что испытаны на прочность.

Для длительных испытаний использовали приспособление, показанное на рис. 4, а, в которое одновременно устанавливается по 20 образцов СПА-5,5 длиной 200 мм. Требуемый уровень напряжений задается с помощью прогиба образцов в средней части и регулируется винтом (осевым перемещением – сближением концов шарнирно опертого стержня). Осевая сила при этом равна силе потере устойчивости (критической силе Эйлера) и остается практически постоянной в процессе нагружения и увеличения прогиба. Периодически проводился «опрос» образцов с помощью тензодатчика силы – значительное уменьшение осевой силы свидетельствовало о разрушении образца. Для сохранения температуры образца при периодической выемке из морозильной камеры и контроля осевой силы, устройства помещали в футляры из пенопласта, изнутри утепляли поролоном как показано на рис. 4, б.



Таблица 1. Результаты испытаний образцов на прочность при температуре минус 30 °С

Table 1. Results of strength tests of samples at a temperature of minus 30 °C

i	$P(i)$	Z	σ_b , МПа	$\sigma_{расч}$, МПа	Отклонение, %
1	0,024	-1,97	1867	1872	0,24
2	0,049	-1,66	1907	1901	-0,32
3	0,073	-1,45	1915	1920	0,27
4	0,098	-1,30	1957	1934	-1,16
5	0,122	-1,17	1960	1947	-0,67
6	0,146	-1,05	1969	1957	-0,60
7	0,171	-0,95	1971	1967	-0,24
8	0,195	-0,86	1973	1975	0,12
9	0,220	-0,77	1977	1983	0,31
10	0,244	-0,69	1981	1991	0,49
11	0,268	-0,62	1986	1998	0,56
12	0,293	-0,55	2000	2004	0,20
13	0,317	-0,48	2007	2011	0,18
14	0,342	-0,41	2018	2017	-0,03
15	0,366	-0,34	2023	2023	0,01
16	0,390	-0,28	2025	2029	0,22
17	0,415	-0,22	2029	2035	0,29
18	0,439	-0,15	2031	2041	0,49
19	0,463	-0,09	2043	2047	0,16
20	0,488	-0,03	2053	2052	-0,02
21	0,512	0,03	2064	2058	-0,27
22	0,537	0,09	2065	2064	-0,08
23	0,561	0,15	2070	2069	-0,04
24	0,585	0,22	2081	2075	-0,30
25	0,610	0,28	2088	2081	-0,32
26	0,634	0,34	2090	2087	-0,16
27	0,659	0,41	2091	2093	0,09
28	0,683	0,48	2096	2099	0,16
29	0,707	0,55	2099	2106	0,34
30	0,732	0,62	2101	2113	0,53
31	0,756	0,69	2104	2120	0,75
32	0,780	0,77	2114	2127	0,62
33	0,805	0,86	2140	2135	-0,24
34	0,829	0,95	2147	2144	-0,16
35	0,854	1,05	2157	2153	-0,18
36	0,878	1,17	2157	2164	0,30
37	0,902	1,30	2187	2176	-0,54
38	0,927	1,45	2192	2190	-0,06
39	0,951	1,66	2231	2209	-1,00
40	0,976	1,97	2237	2239	0,05

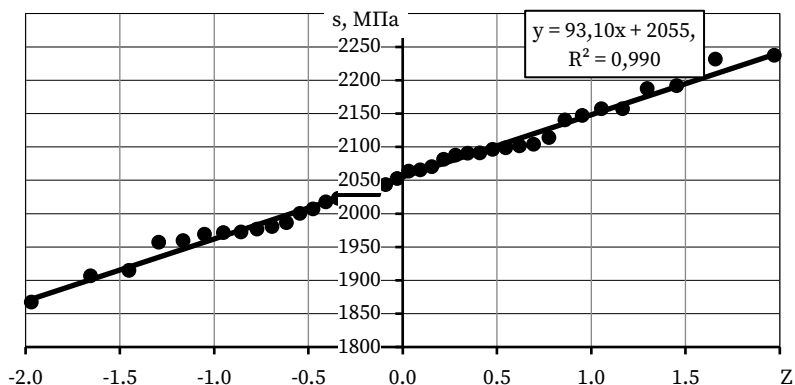


Рис. 3. Распределение образцов СПА-5,5 по прочности при температуре минус 30 °С
Fig. 3. Distribution of SPA-5.5 samples by strength at a temperature of minus 30 °C



Рис. 4. Стенды для испытаний одновременно 20 образцов СПА-5,5:
а - на долговечность при продольном изгибе; б - футляры для сохранения температуры образцов
Fig. 4. Test benches for 20 SPA-5.5 samples at the same time:
a - for durability during longitudinal bending; b - cases for maintaining the temperature of the samples

Обработка результатов по долговечности аналогична приведенному выше алгоритму статистической обработки данных определения прочности образцов.

Определяют значение вероятности $P(i)$ и величину Z обратного нормального распределения, как было показано выше. Для количества испытанных образцов 40 шт. эти величины имеют те же значения, что и в табл. 1. Экспериментальные значения долговечности располагают в порядке возрастания. Строят график зависимости логарифма долговечности от величины Z (рис. 5).

Закон распределения долговечности образцов соответствует логарифмически-нормальному с высокой корреляцией ($R^2=0,985$). Зависимость логарифма долговечности образцов от обратной функции нормального распределения носит линейный характер:

$$\ln(\tau) = b_{\tau} \cdot Z + a_{\tau}, \quad (11)$$

где b_{τ} , a_{τ} – эмпирические коэффициенты, равные соответственно: $b_{\tau}=1,166$; $a_{\tau}=11,835$.

В табл. 2 приведены расчетные значения логарифма долговечности образцов, и отклонения экспериментальных данных от расчетных. Можно заключить, что отклонения не превышают $\pm 1,5-2\%$, лишь у первых двух образцов в выборке экспериментальные значения долговечности аномально отличаются от расчетных (на 64% и 34%). Эти два образца сломались в процессе нагружения и в расчет не принимались.

Следующий этап – совместная обработка результатов определения прочности и долговечности. В основу положена гипотеза о том, что две представительные выборки от одной партии имеют образцы, идентичные по своим свойствам – прочности и долговечности. Поскольку оба вида испытаний являются разрушающими, то на одних и тех же образцах измерение контроля их прочности и долговечности выполнить невозможно.



В соответствии с гипотезой, присваивают вероятность разрушения более нагруженных образцов их меньшей долговечности (это соответствует и фундаментальным представлениям – чем больше нагрузка, тем меньше долговечность, см. рис. 1). За величину интенсивности приложенной нагрузки принято отношение постоянно

действующего напряжения к их временной прочности $\sigma_{отн} = \sigma_t / \sigma_b$, которое показывает, на какую величину нагружен индивидуально каждый образец от его исходной прочности. Совместная обработка результатов приведена в табл. 3.

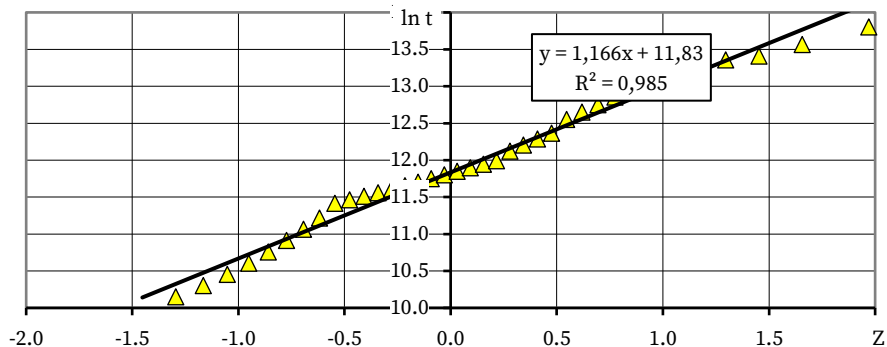


Рис. 3. Распределение образцов СПА-5,5 по прочности при температуре минус 30 °С
Fig. 3. Distribution of SPA-5.5 samples by strength at a temperature of minus 30 °C

Таблица 3. Совместная обработка результатов определения прочности и долговечности
Table 3. Joint processing of the results of determining strength and durability

<i>i</i>	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{отн}$	$\ln(\tau_{расч}, с)$	<i>i</i>	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{отн}$	$\ln(\tau_{расч}, с)$
1	1872	0,923	9,537	21	2058	0,839	11,871
2	1901	0,909	9,903	22	2064	0,837	11,942
3	1920	0,900	10,141	23	2069	0,835	12,014
4	1934	0,893	10,324	24	2075	0,832	12,086
5	1947	0,887	10,476	25	2081	0,830	12,160
6	1957	0,882	10,608	26	2087	0,827	12,235
7	1967	0,878	10,726	27	2093	0,825	12,311
8	1975	0,874	10,833	28	2099	0,823	12,390
9	1983	0,871	10,933	29	2106	0,820	12,471
10	1991	0,868	11,026	30	2113	0,817	12,556
11	1998	0,865	11,114	31	2120	0,815	12,644
12	2004	0,862	11,199	32	2127	0,812	12,737
13	2011	0,859	11,280	33	2135	0,809	12,837
14	2017	0,856	11,359	34	2144	0,806	12,944
15	2023	0,854	11,435	35	2153	0,802	13,062
16	2029	0,851	11,510	36	2164	0,798	13,194
17	2035	0,849	11,584	37	2176	0,794	13,346
18	2041	0,846	11,656	38	2190	0,788	13,529
19	2047	0,844	11,728	39	2209	0,782	13,767
20	2052	0,842	11,799	40	2239	0,771	14,133



На рис. 6 показана силовая зависимость долговечности – зависимость относительной длительной прочности от долговечности для исследованных образцов стеклопластика. Можно заключить, что в приведенных координатах (по оси ординат – относительной прочности, по оси абсцисс – логарифма долговечности) силовая зависимость соответствует степенному закону с высоким коэффициентом корреляции $R^2=0,999$.

$$\sigma_{отн} = 2,594 \cdot (\ln\tau)^{-0,456} \quad (12)$$

Эту зависимость можно использовать для предсказания долговечности исследуемого стеклопластика в зависимости от уровня приложенного напряжения при температуре минус 30 °С.

С помощью продемонстрированного метода длительных испытаний и статистической обработки результатов были проведены массовые испытания на долговечность одной и той же партии стеклопластиковых стержней СПА-5,5 в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С при продольном изгибе и растяжении, обобщенные результаты приведены в работе [22] и на рис. 7.

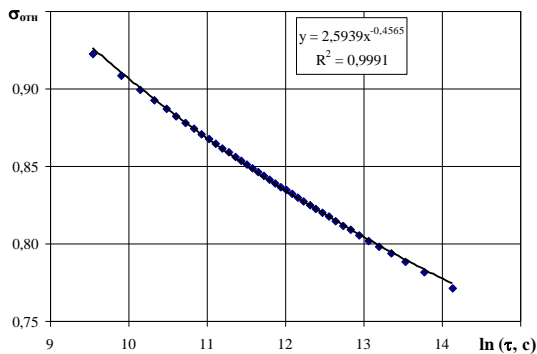


Рис. 6. Зависимость относительной длительной прочности от долговечности образцов СПА-5,5 при температуре минус 30 °С

Fig. 6. The dependence of the relative long-term strength on the durability of SPA-5.5 samples at a temperature of minus 30 °С

Учитывая температурную зависимость прочности, все результаты испытаний при разных температурах приведены к нормальным условиям – отнесены к значениям прочности при комнатной температуре, поэтому величина $\sigma_{отн}$ имеет значения больше 1,0 для образцов, испытанных при температуре минус 30 °С. Силовые зависимости на рисунке 7 позволяют оценить длительную прочность для срока службы строительных стеклопластиковых изделий 100 лет ($\ln\tau = 21,87$), все кривые асимптотически сходятся около значения $\sigma_{отн} = 0,6$. Это соответствует данным работ [5, 23-24], согласно которым предел длительной прочности стеклопластика составляет 0,6-0,65 от временной прочности. Испытания при

комнатной температуре образцов СПА-5,5, нагруженных продольным изгибом напряжением 1206 МПа, насчитывают уже 20 лет и продолжают [22] (за это время разрушился 21 образец из 40).

Предложенный метод испытаний и статистической обработки результатов может быть использован и в других приложениях – например, при исследовании химического старения, циклической усталости, коррозионного разрушения под нагрузкой или длительной электрической прочности материалов в электротехнике под действием частичных разрядов. Условием успешного применения этих методов является широкий диапазон разбросов характеристик образцов внутри выборки – в продемонстрированном примере около величина разброса составила 10–16% по прочности от среднего значения, и в 10^5 раз – по долговечности.

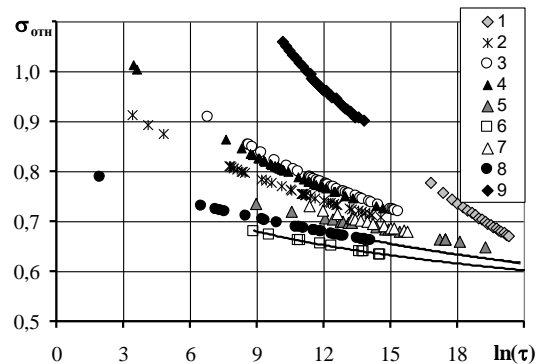


Рис. 7. График силовой зависимости [22] стержней СПА-5,5 при продольном изгибе (1–4, 6–9) и растяжении (5) под действием постоянных напряжений и температур (время в секундах):
1 – 1206 МПа, +23 °С; 2 – 1368 МПа, +23 °С; 3 – 1471 МПа, +20 °С; 4 – 1520 МПа, +20 °С; 5 – 836 МПа, +20 °С; 6 – 1172 МПа, +50 °С; 7 – 1213 МПа, +50 °С; 8 – 1280 МПа, +50 °С; 9 – 1727 МПа, -30 °С

Fig. 7. Graph of the force dependence [22] of SPA-5.5 rods under longitudinal bending (1–4, 6–9) and stretching (5) under the action of constant stresses and temperatures (time in c):
1 – 1206 МПа, +23 °С; 2 – 1368 МПа, +23 °С; 3 – 1471 МПа, +20 °С; 4 – 1520 МПа, +20 °С; 5 – 836 МПа, +20 °С; 6 – 1172 МПа, +50 °С; 7 – 1213 МПа, +50 °С; 8 – 1280 МПа, +50 °С; 9 – 1727 МПа, -30 °С

ВЫВОДЫ

1. Показано расхождение теорий относительно прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов, в большей степени результаты прогнозирования зависят от метода математической обработки экспериментальных данных.



2. Предложен новый метод испытаний строительных стеклопластиков на долговечность под действием постоянных напряжений при продольном изгибе и статистической обработке результатов длительных испытаний.

3. Метод продемонстрирован на примере длительных испытаний стеклопластиковой арматуры диаметром 5,5 мм при температуре минус 30 °С длительностью 12 суток. Полученный закон распределения образцов по прочности соответствует нормальному, по долговечности – логарифмически-нормальному закону распределения.

4. Силовые зависимости долговечности носят степенной характер. Определена величина относительной длительной прочности 0,6 при долговечности стеклопластика 100 лет в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С, что соответствует экспериментальным данным других авторов.

Исследования выполнены при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Работа выполнена в рамках госзадания на тему "Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легковозобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты", № госрегистрации 121061500030-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климатические испытания строительных материалов: монография. М.: Изд-во АСВ. 2017. 558 с.
2. **Blaznov A.N., Krasnova A.S., Krasnov A.A., Zhurkovsky M.E.** Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. *Polymer Testing*. 2017. V. 63. P. 434-439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.006>.
3. **Blaznov A.N., Markin V.B., Krotov A.S., Firsov V.V., Bychin N.V., Sakoshev Z.G.** Basalt plastic properties under climatic aging conditions. *Smart Composite in Construction*. 2021. V. 2. N 1. P. 29-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46168573>
4. Энциклопедия полимеров. В 3 т. Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1977. С. 892-893.
5. **Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А.** Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне. 1971. 238 с.
6. **Tikhonov V.B., Blaznov A.N., Savin V.F.** Method of fiberglass testing for static durability. *Inorganic Materials*. 2011. V. 47. N 15. P. 1702-1706. DOI 10.1134/S0020168511150167.
7. **Бартнев Г.М.** Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия. 1984. 280 с.
8. **Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника. 1993. 475 с.
9. **Блазнов А.Н.** Влияние внешней среды на прочность стеклопластиковой строительной арматуры. Климатические испытания строительных материалов: монография. М.: Изд-во АСВ. 2017. С. 367-465.
10. **Журков С.Н., Нарзуллаев В.А.** Временная зависимость прочности твердых тел. *Журнал технической физики*. 1953. Т. 23. Вып. 10. С. 1677-1689.
11. **Журков С.Н.** Кинетическая концепция прочности твердых тел. (Термофлуктуационный механизм разрушения). *Вестник АН СССР*. 1968. № 3. С. 46-52.
12. **Журков С.Н., Куксенко В.С.** Микромеханика разрушения полимеров. *Механика полимеров*. 1974. № 5. С. 792-801.
13. **Кауш Г.** Разрушение полимеров. М.: Мир. 1981. 440 с.
14. **Ратнер С.Б., Ярцев В.П.** Работоспособность пластмассы под нагрузкой и пути ее прогноза и повышения. М.: НИИТЭХИМ. 1979. Вып. 3 (153). 65 с.
15. **Ратнер С.Б.** Физические закономерности прогнозирования работоспособности конструкционных пластических масс. *Пластические массы*. 1990. № 6. С. 35-48.
16. **Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М.** Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига: Зинатне. 1966. 260 с.
17. **Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П., Рудольф А.Я., Старцев О.В., Тихонов В.Б.** Методы механических испытаний композиционных стержней: монография. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2011. 314 с.
18. **Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Атысова Е.В., Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю.** Влияние температуры на прочность базальто- и стеклопластиков. *Ползуновский вестник*. 2014. № 4. Т. 2. С. 154-158.
19. **Луговой А.Н., Савин В.Ф., Петров М.Г., Блазнов А.Н., Старцев О.В.** Хладостойкость и морозостойкость стеклопластика, выпускаемого ООО «Бийский завод стеклопластиков». *Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всероссийской научно-практической конференции 22-24 мая 2007 г.* Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2007. С. 149-153.
20. **Блазнов А.Н., Локтев М.Ю., Луговой А.Н., Поздеев С.П., Рудольф А.Я., Савин В.Ф., Старцев О.В., Тихонов В.Б.** Патент № 2451281 РФ. 2012.
21. **Вейбулл В.** Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение. 1964. 275 с.
22. **Startsev O.V., Blaznov A.N., Petrov M.G., Atyasova E.V.** A Study of the Durability of Polymer Composites under Static Loads. *Polymer Science, Series D*. 2019. V. 12. N 4. P. 440-448. DOI: 10.1134/S1995421219040166



23. **Берг О.Я., Навевич Ю.М.** Механические свойства стеклопластиковой арматуры больших сечений. *Бетон и железобетон*. 1964. № 12. С. 532-535.
24. **Фролов Н.П.** Технология изготовления стеклопластиковой арматуры и некоторые ее свойства. *Бетон и железобетон*. 1965. № 9. С. 5-8.

Поступила в редакцию 13.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

- Climatic tests of building materials: monograph. Moscow: Izd-vo ASV. 2017. 558 p. (in Russian).
- Blaznov A.N., Krasnova A.S., Krasnov A.A., Zhurkovsky M.E.** Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. *Polymer Testing*. 2017. V. 63. P. 434-439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.006>
- Blaznov A.N., Markin V.B., Krotov A.S., Firsov V.V., Bychin N.V., Sakoshev Z.G.** Basalt plastic properties under climatic aging conditions. *Smart Composite in Construction*. 2021. V. 2. N 1. P. 29-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46168573>
- Encyclopedia of polymers. In 3 vol. V. 1. M.: Sovetskaya ehntsiklopediya. 1977. P. 892-893 (in Russian).
- Skudra A.M., Bulavs F.Ya., Rotsens K.A.** Creep and static fatigue of reinforced plastics. Riga: Zinatne. 1971. 238 p. (in Russian).
- Tikhonov V.B., Blaznov A.N., Savin V.F.** Method of fiberglass testing for static durability. *Inorganic Materials*. 2011. V. 47. N 15. P. 1702-1706. DOI 10.1134/S0020168511150167.
- Bartenev G.M.** Strength and mechanism of polymer destruction. M.: Khimiya. 1984. 280 p. (in Russian).
- Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Physical bases of forecasting the durability of structural materials. SPb: Politehnika. 1993. 475 p. (in Russian).
- Blaznov A.N.** Influence of the external environment on the strength of fiberglass construction reinforcement. Climatic tests of building materials: monograph. M.: Izd-vo ASV. 2017. P. 367-465 (in Russian).
- Zhurkov S.N., Narzullaev V.A.** Time dependence of the strength of solids. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1953. V. 23. Iss. 10. P. 1677-1689 (in Russian).
- Zhurkov S.N.** Kinetic concept of the strength of solids (Thermal fluctuation mechanism of destruction). *Vestnik AN SSSR*. 1968. N. 3. P. 46-52 (in Russian).
- Zhurkov S.N., Kuksenko V.S.** Micromechanics of polymer destruction. *Mekhanika polimerov*. 1974. N. 5. P. 792-801 (in Russian).
- Kaush G.** Destruction of polymers. M.: Mir. 1981. 440 p. (in Russian).
- Ratner S.B., Yartsev V.P.** Plastic performance under load and ways of its prediction and improvement. M.: NIITEKHIM. 1979. Iss. 3 (153). 65 p. (in Russian).
- Ratner S.B.** Physical regularities of predicting the operability of structural plastic masses. *Plasticheskie massy*. 1990. N. 6. P. 35-48 (in Russian).
- Tarnopolsky Yu.M., Skudra A.M.** Structural strength and deformability of fiberglass. Riga: Zinatne. 1966. 260 p. (in Russian).
- Blaznov A.N., Savin V.F., Volkov Yu.P., Rudolf A.Ya., Startsev O.V., Tikhonov V.B.** Methods of mechanical testing of composite rods: monograph. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta. 2011. 314 p. (in Russian).
- Blaznov A.N., Savin V.F., Atyasova E.V., Babenko FI., Fedorov Yu.Yu.** The influence of temperature on the strength of basalt and fiberglass. *Polzunovskii vestnik*. 2014. N 4. V. 2. P. 154-158 (in Russian).
- Lugovoy A.N., Savin V.F., Petrov M.G., Blaznov A.N., Startsev O.V.** Cold resistance and frost resistance of fiberglass produced by Biysk Fiberglass Plant LLC. *Tekhnika i tekhnologiya proizvodstva teploizolyatsionnykh materialov iz mineral'nogo syr'ya: Doklady VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 22-24 maya 2007 g.* Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta. 2007. P. 149-153 (in Russian).
- Blaznov A.N., Loktev M.Yu., Lugovoy A.N., Pozdeev S.P., Rudolf A.Ya., Savin V.F., Startsev O.V., Tikhonov V.B.** RF Patent N 2451281. 2012 (in Russian).
- Weibull V.** Fatigue tests and analysis of their results. M.: Mashinostroenie. 1964. 275 p. (in Russian).
- Startsev O.V., Blaznov A.N., Petrov M.G., Atyasova E.V.** A Study of the Durability of Polymer Composites under Static Loads. *Polymer Science, Series D*. 2019. V. 12. N 4. P. 440-448. DOI: 10.1134/S1995421219040166
- Berg O.Ya., Nagevich Yu.M.** Mechanical properties of fiberglass reinforcement of large cross-sections. *Beton i zhelezobeton*. 1964. N 12. P. 532-535 (in Russian).
- Frolov N.P.** Manufacturing technology of fiberglass reinforcement and some of its properties. *Beton i zhelezobeton*. 1965. N 9. P. 5-8 (in Russian).

Received 13.09.2021

Accepted 20.09.2021



УДК 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Рудобашта

Станислав Павлович Рудобашта

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru



Рассмотрена глубина проникновения электромагнитного поля в материалы в зависимости от его частоты. Обсуждены работы по математическому моделированию процессов электромагнитного нагрева и сушки материалов в инфракрасном и сверхвысокочастотном диапазонах. Указаны преимущества и недостатки аналитических и численных методов решения задач электромагнитного нагрева изделий. Отмечено, что электромагнитный нагрев влажных строительных материалов часто сопровождается испарением из них влаги, что следует учитывать при математическом моделировании процесса их электромагнитного нагрева. Выделены роль тепловой обработка бетона, которая стала важной стадией технологического процесса в производстве строительных изделий, значимость электротермической обработки железобетонных изделий и электромагнитных методов нагрева - в различных диапазонах частот. Представлена аналитическая математическая модель электромагнитного нагрева пластины под воздействием потока излучения, проникающего в тело по закону Бугера. Она учитывает сток теплоты на испарение влаги, происходящий у поверхности пластины, и ее конвективный теплообмен с внешней газовой средой. Модель проанализирована на соответствие реальному процессу в условиях инфракрасного нагрева путем сопоставления расчетных и экспериментальных термограмм. Показана ее адекватность реальному процессу. На основе этой модели показана возможность выбора методом численного компьютерного анализа необходимого технологического режима электромагнитного нагрева. Рассмотренная математическая модель рекомендована к практическому применению в строительной технологии.

Ключевые слова: электромагнитный нагрев, строительные материалы, математическое моделирование, динамика нагрева

Для цитирования:

Рудобашта С.П. Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. №. 3. С. 46-57 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46



UDC 536.24

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC HEATING PROCESSES OF BUILDING MATERIALS

S.P. Rudobashta

Stanislav P. Rudobashta

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127550, Russia
E-mail: rudobashta@mail.ru



The paper considers the depth of penetration of electromagnetic fields into materials as a function of frequency. The author discusses the works on mathematical modelling of electromagnetic heating and drying of materials in the infrared and ultra-high frequency ranges. The article indicates the advantages and disadvantages of analytical and numerical methods for solving problems of electromagnetic product heating. It is noted that the electromagnetic heating of moist building materials is often accompanied by evaporation of moisture. It should be taken into account in the mathematical modelling of their electromagnetic heating process. Further the article highlights the role of heat treatment of concrete, which has become an important stage of the technological process of building materials production. The electro-thermal treatment of reinforced concrete products and electromagnetic heating methods in different frequency ranges are relevant. The article presents the analytical mathematical model of electromagnetic heating of a plate under the influence of a radiation flux penetrating the body according to Booger's law. It takes into account the heat flow to the evaporation of moisture occurring at the surface of the plate, and its convective heat and mass exchange with the external gas medium. We analyse the model for consistency with the real process under infra-red heating conditions by comparing calculated and experimental thermograms. Its relevance to the real process is shown. The author shows the possibility of selecting the required electromagnetic heating process mode by means of numerical computer analysis. The mathematical model considered is recommended for practical application in building technology.

Key words: electromagnetic heating, building materials, mathematical modeling, heating dynamics

For citation:

Rudobashta S.P. Mathematical modeling of processes electromagnetic heating of building materials. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No 3. P. 46-57 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46



ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитный нагрев материалов токами различной частоты - в инфракрасном (ИК), высокочастотном (ТВЧ) и сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах в настоящее время достаточно широко применяется в различных технологиях [1, 2]. Его достоинством является выделение электромагнитной энергии внутри материала, что обеспечивает качественный и быстрый нагрев изделия. Глубина проникновения электромагнитной энергии Δ (м) при облучении изделия определяется выражением [3]

$$\Delta = 9,55 \cdot 10^7 / f \sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где f - частота электромагнитного поля, Гц;

ϵ' - относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

При ТВЧ-нагреве $f = 10\text{--}25$ МГц, при СВЧ-нагреве обычно используется разрешенная частота $f = 2450$ МГц. Анализ глубины проникновения электромагнитного поля в материал на основе уравнения (1) при частотах f , характерных для ТВЧ- и СВЧ-диапазонов, показывает, что она достаточно велика (масштаб сантиметров), а коэффициент затухания лучистого потока, поступающего в тело, соответственно мал. По этой причине при ТВЧ- и СВЧ-нагреве строительного изделия, в силу большой глубины проникновения в него электромагнитного поля, внутренний объемный источник теплоты q_v (Вт/м³) в теле можно принять постоянным: $q_v = \text{const}$. Длина волн в инфракрасном диапазоне составляет $\lambda = 0.8 \cdot 10^6\text{--}0.8 \cdot 10^3$ м, чему соответствует частота $f = c/\lambda = 3.75 \cdot 10^{11}\text{--}3.75 \cdot 10^{14}$ Гц. При этих частотах глубина проникновения электромагнитного поля не превышает нескольких мм, что и предопределяет область применения ИК-нагрева: это тонкостенные изделия.

При электромагнитном энергоподводе к влажным материалам, одновременно с их нагревом, происходит испарение влаги, сопровождающееся стоком теплоты на этот процесс, что необходимо учитывать в математической модели. Во многих случаях именно удаление влаги из материала (сушка) является целью электромагнитного энергоподвода. Для термолабильных материалов для сохранения их качества электромагнитный энергоподвод осуществляется, как правило, в осциллирующем (прерывистом) режиме [5, 7-15], который позволяет не перегревать материал. Электромагнитный энергоподвод часто комбинируют с конвективным [1, 2, 4, 5, 7]. Математические модели, описывающие тепломассоперенос при прерывистом конвективном, электромагнитном и комбинированном энергоподводе, приведены в [5-8, 10-15]. Они используют как численные [6-8, 11, 12, 15], так и аналитические [3, 10, 13, 14] методы решения задач. В [11, 13, 14] полученные решения были использованы для

компьютерного анализа влияния параметров осциллирующего электромагнитного нагрева на технологический процесс с целью поиска необходимого технологического режима.

Достоинством аналитических методов является прозрачность полученных решений для анализа и возможность не прогонять решение нестационарных задач через весь временной интервал, а сразу вычислять искомую функцию, что ускоряет вычисление. Но аналитические решения, как правило, удается получить только для линейных задач, характеризующихся постоянством теплофизических характеристик и других параметров процесса. Важным преимуществом численных методов является возможность выполнения расчетов для нелинейных задач - при переменных электро- и теплофизических характеристиках процесса. Отметим, что применение, так называемого, «зонального метода» [16], в соответствии с которым весь процесс разбивается на ряд зон, в которых параметры процесса принимаются постоянными, позволяет рассчитывать кинетику на основе аналитических решений линейных задач массо- и теплопроводности. Близким по физической сущности, но имеющим свои отличительные особенности, является «метод микропроцессов» [17]. Оба метода в настоящее время с успехом применяются для расчета тепломассопереноса в различных технологических процессах. Зональный метод кинетического расчета различных процессов использовался во многих работах, в частности, в работах последнего времени [18-22].

При приготовлении строительных смесей (бетонов и др.) в строительной индустрии в настоящее время используются различные способы улучшения их качества или качества самого технологического процесса (применение различных добавок, например в [23], тепловой обработки, электрических и электромагнитных воздействий [24]). В [24] отмечается, что тепловая обработка бетона, выполняемая тем или иным способом, стала неотъемлемой частью современного технологического процесса в строительной индустрии и, что наряду с традиционным методом тепловлажностной обработки бетонов водяным паром, в последние годы большое внимание уделяется применению различных методов электро-термической обработки железобетонных изделий, а также электромагнитных воздействий. Согласно [25] в промышленности эксплуатируются высокопроизводительные установки для тепловой СВЧ-обработки бетонных изделий. Преимуществом этих установок является равномерный нагрев по всему объему бетонного изделия, в результате чего значительно ускоряется технологический процесс. При тепловой обработке обычно осуществляется нагрев исходных компонентов или готовой бетонной смеси (до или после формирования изделия) до температуры порядка 50-80°C - это предварительный разогрев, затем изделие выдерживается при этой температуре и твердеет в течение определённого времени



(изотермическая стадия), после этого оно постепенно охлаждается и проходит следующие стадии технологического процесса [24]. Из этого следует, что при нагреве температура строительного изделия не должна превышать определенной величины, а в течение всего процесса изменяться определенным образом.

Для правильного выбора теплового режима электромагнитного нагрева бетонного изделия (СВЧ, инфракрасного и т.д.) целесообразно иметь описывающую этот процесс математическую модель, с помощью которой можно осуществлять компьютерное моделирование процесса и находить необходимый технологический режим.

Цель данной работы – рассмотреть аналитическую математическую модель, описывающую осциллирующий электромагнитный нагрев строительного изделия (материала) в форме пластины и показать ее возможности при выборе необходимого технологического режима.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА ПЛА- СТИНЫ

При практическом применении осциллирующего электромагнитного нагрева прерывистость облучения материала может обеспечиваться за счет контроллера, отслеживающего температуру в той или иной точке материала и отключающего, и включающего источник излучения в нужные моменты времени. Но необходимый осциллирующий температурный режим можно задать изначально с помощью программы, описывающей этот процесс, и, используя компьютер, моделировать процесс, подбирая его необходимые параметры. В [10, 13, 14] были разработаны аналитические математические модели для тел разной формы: пластины [10], шара [13] и цилиндра [14], описывающие их осциллирующий электромагнитный нагрев. Рассмотрим модель для пластины, поскольку она наиболее типична для строительных изделий.

Задача в [10] сформулирована применительно к влажному телу и предполагает испарение из него влаги. При этом были приняты следующие условия и допущения: 1) тело имеет форму неограниченной пластины толщиной R и находится на поверхности, непроницаемой для потоков теплоты и влаги; 2) противоположная ее поверхность участвует в процессе теплообмена с газовой средой по законам тепло и массотдачи; 3) внутренние фазовые превращения (сток теплоты на испарение влаги имеет место у поверхности тела); 4) поглощение лучистой энергии происходит согласно закону Бугера–Ламберта–Бера; 5) коэффициент проницаемости тела равен нулю; 6) циклы “нагрев–остывание” тела одинаковы по длительности с одинаковыми значениями в них длительностей стадий нагрева $\tau_{\text{наг}}$ и остывания τ_0 ; 7) все теплофизические и электрофизические характеристики материала,

кинетические характеристики процесса, а также температура газовой среды и концентрация пара в ней постоянны. Задача электромагнитного нагрева тела предполагает его теплообмен с внешней газовой средой и сток теплоты на испарение влаги, который происходит у поверхности тела. Задача описывает также двухсторонний нагрев пластины, при этом начало координат размещено в центральной плоскости пластины.

С учетом приведенных выше условий задача нагрева пластины в осциллирующем электромагнитном поле имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{c\rho} \mu^* q_0 \exp[-\mu^*(R-x)] (1-R^*) f_1(\tau), \quad (2)$$

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = f_2(x), \quad 0 \leq x \leq R; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \tau > 0; \quad (4)$$

$$\left. \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=R} = \alpha (t_c - t(R)) - r^* \cdot i(\tau), \quad \tau > 0; \quad (5)$$

$$f_1(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta(\tau - n\tau_0) - \eta[\tau - (n\tau_0 + \tau_{\text{наг}})], \quad (6)$$

где $a, c, \rho_0, \mu^*, q_0, A, \lambda, \alpha, R, t_c, r^* = \text{const}$;
 t – локальная температура в пластине, °C;
 τ – время,
 $c, a, \lambda, c\rho$ – коэффициенты температуропроводности (м²/с) и теплопроводности (Вт/(м·К)), объемная теплоемкость пластины (Дж/(м³·К)), соответственно;
 μ^* – коэффициент ослабления, м⁻¹;
 R^* – коэффициент отражения, безразмерный;
 r^* – теплота парообразования, Дж/кг;
 q_0 – плотность потока лучистой энергии, падающей на пластину, Вт/м²;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_c – температура внешней среды, °C

$f_1(\tau)$ – единичная периодическая функция, описывающая цикличность облучения;

$i(\tau)$ – интенсивность сушки, кг/(м²·с);

η – единичная функция Хевисайда, с использованием которой функция $f_1(\tau)$ может быть записана как $f_1(\tau) = \eta(\tau) - \eta(\tau - \tau_{\text{наг}})$ (при $n = 0$ – один цикл облучения).

Периодическая функция $f_1(\tau)$ иллюстрируется рис. 1.

Второе слагаемое уравнения (2) выражает действующий внутри пластины источник теплоты, вызванный поглощением лучистой энергии, уравнение (3) описывает начальное условие, которое в целях общности постановки задачи принято неравномерным, уравнение (4) выражает отсутствие теплового потока в пластине при координате $x = 0$, уравнение (5) – граничное условие теплообмена 3-го рода, которое описывает теплообмен по закону теплоотдачи Ньютона с учетом стока теплоты на испарение влаги у поверхности тела. При $i(\tau) = 0$



испарение отсутствует, и задача описывает «чистый» теплообмен пластины с электромагнитным подводом энергии и конвективным ее теплообменом с внешней средой. При этом при $t > t_c$ часть подведенной электромагнитной энергии теряется в окружающую среду, а при $t < t_c$ имеет место комбинированный конвективно-электромагнитный нагрев пластины.

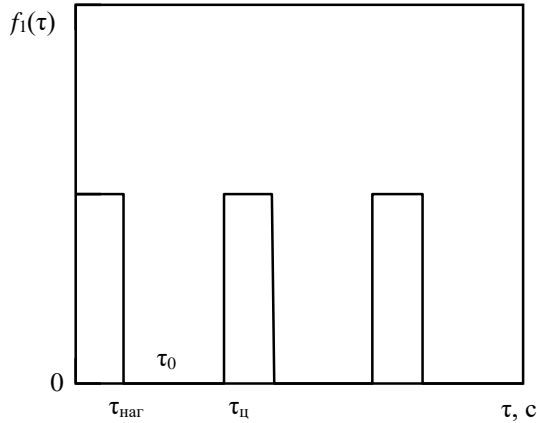


Рис. 1. Периодическая функция $f_1(\tau)$ в уравнении (2): $\tau_{ц}$ – время цикла; τ_0 – время нагрева в цикле; τ_0 – время остывания в цикле

Fig. 1. The periodic function $f_1(\tau)$ in equation (2): τ_c – cycle time; τ_0 – heating time in the cycle; τ_0 – cooling time in the cycle

Приведем решение для случая $t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_n$, оно равно сумме слагаемых [10]:

$$W(\xi, Fo) = W_1(\xi, Fo) + W_2(\xi, Fo) + W_3(\xi, Fo) \quad (7)$$

где:

$$W_1(\xi, Fo) = 2N_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (8)$$

$$W_2(\xi, Fo) = 2\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(\mu_0^*) \Psi_n(Fo) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} \quad (9)$$

$$W_3(\xi, Fo) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) D_n(Fo) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (10)$$

здесь $\mu_n > 0$ – корни уравнения,

$$ctg \mu = \frac{\mu}{Bi} \quad (11)$$

$Bi = \alpha R / \lambda$ – число Био тепловое;

$\xi = x/R$; $Fo = \alpha \tau / R^2$ – число Фурье тепловое;

t_n – начальная температура материала, °C;

$$N_0 = \frac{t_n - t^*_{c}}{t_n - t_c};$$

$$\theta_0 = \frac{\mu^* q_0 A R^2}{\lambda(t_n - t_c)}; W(\xi, Fo) = \frac{t_1(x, \tau) - t_c}{t_n - t_c};$$

$$\varphi(\tau) = \frac{r \cdot i(\tau)}{\alpha}; t_1(x, \tau) = t(x, \tau) + \varphi(\tau).$$

Средняя по объему температура пластины равна

$$\bar{W}(Fo) = \int_0^1 W(\xi, Fo) d\xi. \quad (12)$$

При небольших интервалах $\tau_{наг}$ и τ_0 в циклах $\tau_{ц}$ «нагрев-остывание» осцилляции температуры не искажают кривую кинетики сушки и она имеет гладкий монотонный характер, что подтверждается экспериментально [26]. Это позволяет использовать для расчета интенсивности сушки $i(\tau)$, входящей в параметр $\varphi(\tau)$, аналитическое решение задачи массопроводности, которое для пластины применительно к среднеобъемному влагосодержанию в теле \bar{u} при $k, \beta_c, u_n, C_c = const$ имеет вид [27]

$$\bar{E} = \frac{\bar{u} - u_p}{u_n - u_p} = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \exp(-\beta_k^2 Fo_m), \quad (13)$$

где u_n и u_p – начальное и равновесное влагосодержание пластины соответственно, кг/(кг сух. м-ла);

β_k – корни характеристического уравнения ($\beta_k > 0$);

$$ctg \beta = \frac{\beta}{Bi_m}, \quad (14)$$

$$B_k = \frac{2Bi_m^2}{\beta_k^2 (Bi_m^2 + \beta_k^2 + Bi_m)}, \quad (15)$$

$Bi_m = \frac{\beta_c R}{k \rho_0 A_p}$ число Био массообменное;

k – коэффициент массопроводности, м²/с;

β_c – коэффициент массоотдачи, м/с;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³.

На основе (13) найдём интенсивность сушки $i(\tau)$

$$i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R \rho_0 = \left[\frac{\rho_0 k}{R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \beta_k^2 \exp(-\beta_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p). \quad (16)$$

Коэффициент массопроводности k в процессе сушки изменяется, являясь функцией температуры и влагосодержания материала: $k = f(u, t)$, но применение зонального метода расчёта [27] позволяет учесть это изменение.

Проанализируем приведенное решение задачи осциллирующего нагрева пластины путём расчёта изменения ее температуры. Пусть $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м. В расчётах примем: 1) открытая поверхность пластины, обращённая к источнику излучения, обдувается потоком воздуха с температурой $t_c = 20$ °C и влагосодержанием $d = 0,01$ кг/(кг сушильного агента), со скоростью $v = 1,5$ м/с; 2) начальная температура пластины: $t_n = 18$ °C; 3) длина пластины по



направлению движения воздуха $l = 0,12$ м. Для этих условий были рассчитаны коэффициенты тепло- и массоотдачи для условий конвективной сушки в первом периоде – по критериальным уравнениям А.В. Нестеренко. Поскольку число Re для этих условий составило $Re = 1,15 \cdot 10^4$, то были использованы следующие формулы [28]:

$$Nu = 0,51 Re^{0.61} Pr^{0.33} Gu^{0.175} \quad (17)$$

$$Sh = 0,49 Re^{0.61} Sc^{0.33} Gu^{0.135} \quad (18)$$

где $Re = vl/\nu_c$ – число Рейнольдса;
 $Pr = \nu_c/a_c$ – число Прандтля;
 $Gu = \frac{T_c - T_{m,m}}{T_c}$ – число Гухмана;
 $Sh = \beta_c l/D$ – число Шервуда;
 v – скорость воздуха, м/с;
 ν_c, a_c – кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха, соответственно, m^2/c ;
 β_c – коэффициент массоотдачи, м/с;
 D – коэффициент диффузии пара в воздухе (коэффициент взаимодиффузии), m^2/c ;
 $T_c, T_{m,m}$ – температура среды (воздуха) и мокрого термометра, соответственно, К.

В результате было получено: $\alpha = 13,8 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$; $\beta_c = 0,015$ м/с. Расчеты выполняли при этих значениях коэффициентов тепло- и массоотдачи, считая их неизменными в процессе сушки - для материала, имеющего следующие характеристики:

$$\rho = 680 \text{ кг}/m^3; \rho_0 = 470 \text{ кг}/m^3; a = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/c;$$

$$\lambda = 0,33 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}; k = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/c;$$

$$R^* = 0,1; u_n = 0,51 \text{ кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла});$$

$$u_p = 0,037 \text{ кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла}); \mu^* = 1000 \text{ л}/\text{м}.$$

Расчеты выполняли для условий, которые были в эксперименте [9] с тем, чтобы иметь возможность проверить адекватность математической модели. Поэтому было далее принято: $q_0 = 2000 \text{ Вт}/m^2$; $r^* = 2437 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$ (это значение r^* равно теплоте парообразования (без учёта теплоты адсорбции) при средней предварительно принятой в расчёте температуре пластины 37°C ; $\tau_{\text{наг}} = 15$ с; $\tau_c = 60$ с.

Температура пластины в цикле изменяется от минимального значения t_{min} до максимального t_{max} ; $\tau_{\text{наг}} = 15$ с; $\tau_c = 60$ с. С использованием приведенных выше данных был рассчитан коэффициент $A_{p,n}$ и далее число Bi_m . Они оказались равными: $A_{p,n} = u_{p,n}/C_{c,n} = 3,42 \text{ (кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла}))/(\text{кг}/m^3)$; $Bi_m = (\beta_c R)/(k\rho_0 A_{p,n}) = 187$. Полученное значение числа Bi_m свидетельствует о том, что в рассматриваемом процессе реализуется чисто внутридиффузионный кинетический режим сушки и, следовательно, параметры β_k и B_k в уравнениях (14) и (15) определяются выражениями [27]: $\beta_k = (2k - 1)\pi/2$; $B_k = 2/\beta_k^2$, которые и были использованы в расчёте.

Расчеты процесса электромагнитного нагрева пластины выполнялись при разных значениях величин τ_c и

$\tau_{\text{наг}}$. На рис. 2 показано распределение температуры по толщине пластины в одном из вариантов расчета. Как видно из рисунка, в данном случае оно незначительно. Это объясняется тем, что число Био при принятых в расчёте параметрах мало ($Bi = \alpha R/\lambda = 0,038$).

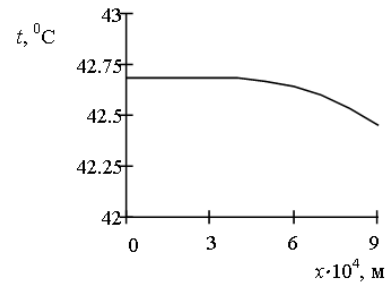


Рис. 2. Расчётное распределение температуры по толщине пластины в конце стадии нагрева в одном цикле ($t_c = 20^\circ\text{C}$; $t_n = 18^\circ\text{C}$)

Fig. 2. Calculated temperature distribution over the plate thickness at the end of the heating stage in one cycle ($t_c = 20^\circ\text{C}$; $t_n = 18^\circ\text{C}$)

Были получены далее расчётные температурные кривые $t_{x=R} = f(\tau)$, которые были сопоставлены с результатами экспериментальных измерений работы [9]. На рис. 3 показано расчетное изменение во времени температуры поверхности пластины. Как видно из рисунка, температура на поверхности пластины колеблется в циклах от в пределах от $t_{\text{min}} = 34^\circ\text{C}$ до $t_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$, продолжительность цикла составляет $\tau_c = 60$ с, а продолжительность стадии нагрева в нем $\tau_{\text{наг}} = 15$ с.

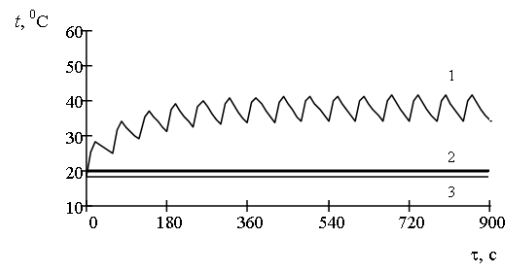


Рис. 3. Расчётное изменение температуры поверхности пластины во времени при осциллирующей инфракрасной сушке:

$$1 - t_{x=R} = f(\tau); 2 - t_c = 20^\circ\text{C}; 3 - t_n = 18^\circ\text{C}$$

Fig. 3. Calculated change of the plate surface temperature over time during oscillating infrared drying:

$$1 - t_{x=R} = f(\tau); 2 - t_c = 20^\circ\text{C}; 3 - t_n = 18^\circ\text{C}$$

На рис. 4 показано изменение температуры поверхности тела в форме пластины (влажного монослоя плоских тел – семян - толщиной) $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м, которые имели



те же теплофизические параметры, что и в расчете. Сушка монослоя осуществлялась инфракрасным способом в осциллирующем режиме при одновременном

продольном обдуве поверхности слоя холодным потоком воздуха с температурой 20 °С со скоростью 1,8 м/с.

С помощью регулятора температура поверхности слоя поддерживалась в интервале 34-40 °С.

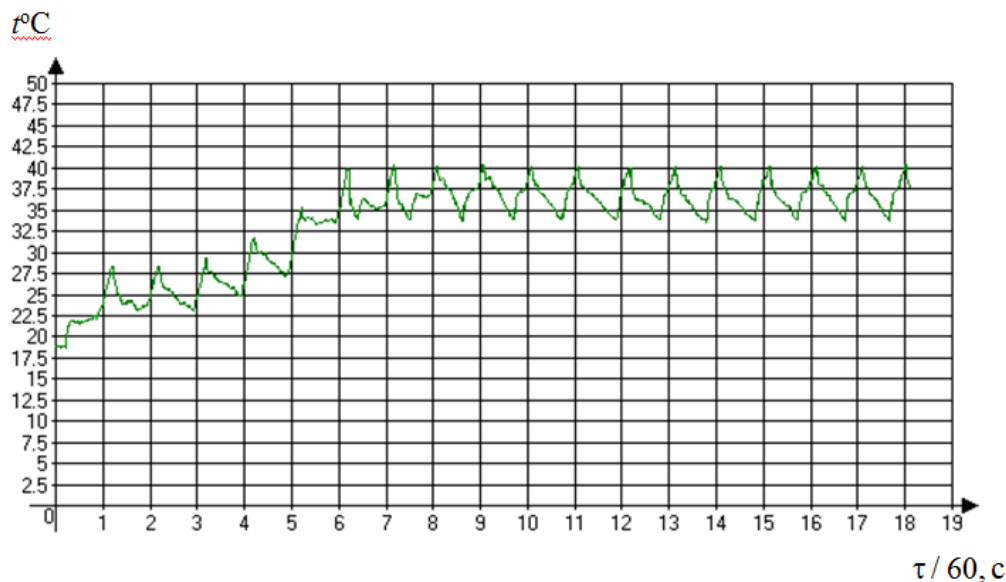


Рис. 4. Экспериментальное изменение температуры поверхности монослоя влажных плоских тел толщиной

$R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м во времени при их осциллирующем ИК-облучении

($v=1,8$ м/с; $u_n = 0,51$ кг/(кг сух. м-ла); $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С [9])

Fig. 4. Experimental change in the surface temperature of a monolayer of wet flat bodies with a thickness $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м in time under their oscillating IR-irradiation

($v=1.8$ m/s; $i_n = 0.51$ kg/(kg dry. m-la); $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С [9])

Как показывает сопоставление рис. 3 и рис. 4, результаты расчета согласуются с опытными данными, а именно: термограммы нагрева поверхности слоя в обоих случаях близки. Существенно отметить, что в эксперименте значения $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С поддерживались с помощью регулятора системы автоматического управления процессом, а при математическом моделировании они подобраны путем задания соответствующих значений параметров τ_c и $\tau_{наг}$ при прочих равных параметрах процесса, причем значение τ_c в обоих случаях одинаково и равно 60 с. Продолжительность стадии нагрева в опытах со временем несколько увеличивается, что объясняется изменением теплофизических характеристик семян вследствие их сушки.

Проведенное сравнение показывает, что аналитические зависимости по динамике нагрева влажной пластины и ее сушке адекватны реальному процессу и могут быть использованы для расчёта и численного анализа процесса ее осциллирующего электромагнитного нагрева. Изменяя параметры осциллирующего нагрева,

такие как плотность лучистого потока q_0 , продолжительность цикла τ_c и стадии нагрева $\tau_{наг}$ в нем, температуру наружного воздуха t_c и скорость v обдува поверхности пластины, можно регулировать динамику нагрева и численным методом находить желаемый температурный режим. Так, при увеличении q_0 и $\tau_{наг}$ значения t_{max} и t_{min} будут расти и будет увеличиваться темп нагрева – до тех пор, пока подведенное с помощью электромагнитного поля тепло не будет полностью отводиться за счет конвективного охлаждения. При высокой температуре внешней среды ($t_c > t$) будет осуществляться комбинированный «конвективно-электромагнитный» нагрев изделия, а математическая модель будет показывать динамику нагрева. Таким образом, приведенное аналитическое решение задачи динамики нагрева пластины в условиях осциллирующей электромагнитного энергоподвода в совокупности с решением задачи массопроводности и зависимости, следующие из них, позволяют рассчитывать температурное поле в пластине, изменение ее среднеобъемной температуры во времени, что несёт в



себе информацию, существенную для организации процесса термообработки влажного строительного материала.

ВЫВОДЫ

1) Проведенное исследование осциллирующего электромагнитного нагрева влажной пластины на основе аналитического решения задачи показало ее адекватность реальному процессу и, следовательно, применимость для анализа температурного режима процесса нагрева строительных материалов с целью нахождения необходимого технологического варианта.

2) Варьируя такие параметры процесса, как плотность лучистого потока, продолжительность цикла облучения и стадии нагрева в нем, интенсивность конвективного теплообмена, можно находить необходимые значения максимальной и минимальной температуры в циклах нагрева, темп нагрева и максимальную температуру в конце стадии нагрева изделия.

ЛИТЕРАТУРА

- Ratti C., Mujumdar A. S.** Handbook of Industrial Drying. 3rd ed. A.S. Mujumdar (Ed). Boca Raton, FL.: CRC Press. 2007.
- Kudra T., Strumillo Cz.** Thermal Processing of Bio-materials. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 1998.
- Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А.** Тепломассоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты. *Теор. основы хим. технологии.* 2021. Т. 55. № 2. С. 195-203.
- Акулич П.В., Драгун В.Л., Куц П.С.** Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: Белорусская наука. 2006.
- Kumar C., Joardder M. U. H., Farrell T. W., Millar G. J., Karim M. A.** Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Drying technology.* 2016. V. 34. N 8. P. 962-973.
- Bon J., Kudra T.** Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. *Drying Technology.* 2007. V. 25. N 4. P. 523-532.
- Акулич П.В., Темрук А.В., Акулич А.В.** Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов. *Инж.-физ. журнал.* 2012. Т. 85. № 5. С. 951-958.
- Vaquiro H. A., Clemente G., Garcia-Perez J. V., Mulet A., Bonb J.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica*. *Chemical engineering research and design.* 2009. V. 87. P. 885-898.
- Рудобашта С.П., Григорьев И.В.** Импульсная инфракрасная сушка семян. *Промышленная теплотехника.* 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
- Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуев Н. А.** Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле. *Теорет. основы хим. технологии.* 2011. Т. 45. № 6. С. 641-647.
- Esturk O.** Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology.* 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673.
- Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Адамович А.Л., Куц П.С., Кундас С.П.** Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых средах при периодическом микроволновом нагреве. *Инж.-физ. журнал.* 2007. Т. 80. № 1. С. 3-12.
- Rudobashta S. P., Zueva G. A.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. of Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718-729.
- Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2018. V. 91. N 1. January. P. 227-236.
- Zhao D., An K., Ding S., Liu L., Xu Z., Wang Z.** Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. *Food and Bioprocess Technology.* 2014. V. 7. N 8. P. 2308-2318.
- Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Очнев Э.Н.** Зональный метод расчета непрерывнодействующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой. *Теор. основы хим. технологии.* 1974. Т. 8. № 1. С. 22-29.
- Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто». 2010. 164 с.
- Рудобашта С.П.** Кинетический расчет массообменных процессов для систем с твердой фазой (сушка и экстрагирование). *Доклады ТСХА.* 2020. С. 186-190.
- Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A.** Farm grain dryer with a heat pump and its calculation. *Journal of General Chemistry.* 2020. V. 90. N 6. P. 1163-1167.
- Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Сушка-стимуляция семян методом осциллирующего инфракрасного облучения. *Передовые достижения в применении автоматизации, роботизации и электротехнологий в АПК: Сборник статей научно-практической конференции, посвященной памяти академика РАСХН, д.т.н., профессора И.Ф. Бородина (90 лет со дня рождения).* Иваново: Общество с ограниченной ответственностью Мегapolis. 2019. С. 156-164.
- Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A.** Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at



- convective-infrared energy sub-supply. *Chem. Technol.* 2019. V. 62. N 12. P. 94-100.
22. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А.** Математическое моделирование процесса сушки материала в аппарате с псевдооживленным слоем. *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-19*. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. 2019. Т. 8. С. 77-80.
 23. **Бориславский В.Т., Горина С.С., Ольшанский Д.Я., Очнев Э.Н., Рудобашта С.П.** Строительный раствор. А.С. № 423765 А1 СССР. Опубл. 15.04.1974.
 24. **Федосов С. В., Бобылев В.И., Соколов А.М.** Электро-тепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. Иваново: ИВГПУ. 2016. 336 с.
 25. **Трембицкий С.М.** Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций. *Бетон и железобетон*. 2006. № 6. С. 23-26.
 26. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Drying Technology*. 2016. V. 34. N 5. P. 505-515.
 27. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
 28. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 422 с.
 8. **Vaquiرو H. A., Clemente G., Garcia-Perez J. V., Mulet A., Bonb J.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica*. *Chemical engineering research and design*. 2009. V. 87. P. 885-898.
 9. **Rudobashta S.P., Grigoriev I.V.** Impulse infrared drying of seeds. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2011. V. 33. N 8. P. 85-90 (in Russian).
 10. **Rudobashta S.P., Kartashov E. M., Zuev A.N.** Heat and mass transfer during drying in an oscillating electromagnetic field. *Teoret. osnovy khim. tekhnologii*. 2011. V. 45. N 6. P. 641-647 (in Russian).
 11. **Esturk O.** Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673.
 12. **Grinchik N.N., Akulich P.V., Adamovich A.L. Kuts P.S., Kundas S.P.** Modeling of non-isothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media with periodic microwave heating. *Inzh.-fiz. zhurnal*. 2007. V. 80. № 1. P. 3-12 (in Russian).
 13. **Rudobashta S. P., Zueva G. A.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. of Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718-729.
 14. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. V. 91. N 1. January. P. 227-236.
 15. **Zhao D., An K., Ding S., Liu L., Xu Z., Wang Z.** Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2014. V. 7. N 8. P. 2308–2318.
 16. **Rudobashta S. P., Planovsky A.N. Ochnev E.N.** Zonal method for calculating continuous mass transfer apparatus for systems with a solid phase. *Teor. osnovy khim. tekhnologii*. 1974. V. 8. N 1. P. 22-29 (in Russian).
 17. **Fedosov S.V.** Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry. Ivanovo: IPK «PresSto». 2010. 164 p. (in Russian).
 18. **Rudobashta S.P.** Kinetic calculation of mass transfer processes for systems with a solid phase (drying and extraction). *Doklady TSKhA*. 2020. P. 186-190 (in Russian).
 19. **Rudobashta S.P., Muravleva E.A, Zueva G.A.** Farm grain dryer with a heat pump and its calculation. *Journal of General Chemistry*. 2020. V. 90. N 6. P. 1163-1167.
 20. **Rudobashta S.P., Zueva G. A., Zuev A.N.** Drying-stimulation of seeds by the method of oscillating infrared irradiation. *Peredovyye dostizheniya v primenenii avtomatizatsii. robotizatsii i elektrotekhnologii v APK. Sbornik statey nauchno-prakticheskoy konferentsii. posvyashchennoy pamyati akademika RASKhN. d.t.n.. professora I.F. Borodina (90 let so dnya rozhdeniya)*. Ivanovo: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu Megapolis. 2019. P. 156-164 (in Russian).

Поступила в редакцию 06.09.2021

Принята к опубликованию 21.09.2021

REFERENCES

1. **Ratti C., Mujumdar A. S.** Handbook of Industrial Drying. 3rd edition. A.S. Mujumdar (Ed). Boca Raton. FL.: CRC Press. 2007.
2. **Kudra T., Strumillo Cz.** Thermal Processing of Bio-materials. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 1998.
3. **Rudobashta S.P., Kartashov E. M., Zueva G.A.** Heat and mass transfer during plate drying in continuous operating electromagnetic field of high and ultra-high frequency. *Teor. osnovy khim. tekhnologii*. 2021. V. 55. N 2. P. 195-203 (in Russian).
4. **Akulich P.V., Dragun V.L., Kuts P.S.** Technologies and techniques for drying and heat treatment of materials. Minsk: Belorusskaya nauka. 2006 (in Russian).
5. **Kumar C., Joardder M. U. H., Farrell T. W., Millar G. J., Karim M. A.** Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Drying technology*. 2016. V. 34. N 8. P. 962-973.
6. **Bon J., Kudra T.** Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. *Drying Technology*. 2007. V. 25. N 4. P. 523-532.
7. **Akulich P.V., Temruk A.V. Akulich A.V.** Modeling and experimental study of heat and moisture transfer during microwave convective drying of plant materials. *Inzh.-fiz. zhurnal*. 2012. V. 85. N 5. P. 951-958 (in Russian).



21. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A.** Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply. *Chem. Technol.* 2019. V. 62. N 12. P. 94-100.
22. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** Mathematical modeling of the material drying process in a fluidized bed apparatus. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-19.* Saratov: Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni Gagarina Yu.A. 2019. V. 8. P. 77-80 (in Russian).
23. **Borislavsky V.T., Gorina S.S., Olshansky D.Ya., Ochnev E.N., Rudobashta S.P.** Mortar. USSR I.C. N 423765 A1. Publ. 15.04.1974.
24. **Fedosov S.V., Bobylev V.I., Sokolov A.M.** Electric heat treatment of concrete with high-frequency currents at precast concrete enterprises. Ivanovo: IVGPU. 2016. 336 c. (in Russian).
25. **Trembitsky S.M.** Energy-saving technologies for the manufacture of reinforced concrete products and structures. *Beton i zhelezobeton.* 2006. N 6. P. 23-26 (in Russian).
26. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Drying Technology.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515.
27. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in solid phase systems. Moscow: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
28. **Lykov A.V.** Drying theory. Moscow: Energiya. 1968. 422 p. (in Russian).

Received 06.09.2021

Accepted 21.09.2021



УДК 693.78

ПРИМЕНЕНИЕ САПРОПЕЛЯ ОЗ. НЕРО ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В.М. Дудин, Н.С. Смекалов, А.Э. Окутин

Владимир Михайлович Дудин

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

E-mail: dudinvm@ystu.ru

Никита Сергеевич Смекалов

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

E-mail: nikitsmekalov@gmail.com

Артём Эдуардович Окутин

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

E-mail: okutin1997@mail.ru



Для повышения водонепроницаемости и прочности асфальтобетонных покрытий широко применяются минеральные порошки, которые в основном получают из карбонатсодержащих горных пород (доломитовые минеральные порошки). С увеличением объёмов дорожного строительства растёт потребность в строительных материалах для его производства, в том числе и в минеральном порошке. Одним из направлений устранения дефицита является применение местных строительных материалов, в том числе и сапропелей. В Ярославской области в оз. Неро накопилось более 250 млн кубометров сапропеля, который губит это озеро. Для восстановления экосистемы озера предлагается его очистка с выемкой сапропеля и использованием его для различных отраслей промышленности и в сельском хозяйстве. Одним из направлений использования высокозольного сапропеля может быть дорожное строительство. Он может использоваться в качестве минерального порошка при производстве асфальтобетонных смесей. В данной работе рассматривается возможность применения сапропеля оз. Неро для производства горячих асфальтобетонных смесей.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, минеральный порошок, сапропель, основные показатели асфальтобетона

Для цитирования:

Дудин В.М., Смекалов Н.С., Окутин А.Э Применение сапропеля оз. Неро ярославской области для производства асфальтобетонных смесей. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 57-67 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_57



UDC 693.78

APPLICATION OF SAPROPEL FROM LAKE NERO, YAROSLAVL REGION, RUSSIA FOR PRODUCTION OF ROAD CONCRETE MIXTURES

V.M. Dudin, N.S. Smekalov, A.E. Okutin

Vladimir M. Dudin

Department of Hydraulic Engineering and Road Construction, Yaroslavl State Technical University, Krivova st.,
40, Yaroslavl, 150048, Russia

E-mail: dudinvm@ystu.ru

Nikita S. Smekalov

Department of Hydraulic Engineering and Road Construction, Yaroslavl State Technical University, Krivova st.,
40, Yaroslavl, 150048, Russia

E-mail: nikitasmekalov@gmail.com

Artem E. Okutin

Department of Hydraulic Engineering and Road Construction, Yaroslavl State Technical University, Krivova st.,
40, Yaroslavl, 150048, Russia

E-mail: okutin1997@mail.ru



Mineral fillers are widely used to improve the water-resisting property and durability of asphalt pavements. Mainly fillers are obtained from carbonate-bearing rocks (dolomite mineral flours). The increasing of road construction leads to the need for increasing of road construction materials, including the mineral flours. Sapropel could help to eliminate this shortage. In the Yaroslavl region, more than 250 million cubic metres of sapropel have accumulated in Lake Nero. It is damaging the lake. To restore the lake's ecosystem, cleaning with sapropel extraction and using for various industries and agriculture are proposed. The road construction can use the high-ash sapropel. It can be used as a mineral flour in production of road concrete mixtures. This paper concerns the possibility of Lake Nero sapropel application for production of road concrete mixtures.

Key words: road concrete mixture, mineral flour, sapropel, features of road concrete

For citation:

Dudin V.M., Smekalov N.S., Okutin A.E. Application of sapropel from lake Nero, Yaroslavl region, Russia for production of road concrete mixtures. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 57-67 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_57



ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества строительства автомобильных дорог зависит от множества факторов. Одним из важнейших – это применение качественных асфальтобетонных смесей. Асфальтобетонная смесь состоит из минеральной составляющей (щебень и песок) и асфальтового вяжущего. Асфальтовое вяжущее включает в себя битум и минеральный порошок.

Минеральный порошок представляет собой материал, который получают путем измельчения горных пород или остатков промышленности. Минеральный порошок служит для повышения технических характеристик автомобильной дороги. При добавлении его в асфальтобетонную смесь удается добиться увеличения ее прочности и плотности за счет того, что мелкие частицы порошка заполняют свободные воздушные поры.

Вследствие этого понижается водонасыщение асфальтобетона, исходя из чего, уменьшается проникновение атмосферных осадков и увеличивается срок службы покрытия.

Минеральный порошок подразделяют на следующие марки (ГОСТ 32761-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования):

- МП-1 – минеральный порошок, активированный из карбонатных горных пород;
- МП-2 – минеральный порошок неактивированный из карбонатных горных пород;
- МП-3 – минеральный порошок неактивированный из некарбонатных горных пород, твердых и порошковых отходов промышленного производства.

Минеральные порошки бывают активированные и неактивированные. Активация заключается в том, что во время помола исходного материала в его состав добавляют специальные поверхностно-активные вещества или совершаются дополнительные воздействия на частицы порошка. Неактивированный минеральный порошок получается обыкновенным дроблением карбонатных горных пород с последующим помолом.

Традиционно минеральные порошки изготавливаются из карбонатных горных пород (известняки, доломиты и доменные шлаки) [1, 2]. Увеличение объемов строительства автомобильных дорог приводит к дефициту строительных материалов, поэтому применение нетрадиционного сырья актуально.

Так в качестве минерального порошка ряд исследователей предлагают использовать золошлаковые отходы ТЭЦ и ТЭС. Переработанные отходы ТЭС позволяют снизить показатель битумоёмкости, повысить прочность и деформативность асфальтобетонов [3-6]. Это позволит снизить колееобразование на асфальтобетонных покрытиях.

Для снижения гидрофильности и увеличения адсорбционной активности минеральных порошков возможно

использование некондиционных алюмосиликатных горных пород после термической обработки. Исследования показали, что введение таких порошков повышают трещиностойкость, сдвигоустойчивость и прочность при сжатии [7, 8].

Применение измельченного вулканического туфа приводит к повышенной трещиностойкости и низкой теплопроводности по сравнению с асфальтобетоном на плотном заполнителе [9-13].

Применение минерального порошка из горючих сланцев для асфальтобетонов описано в работах [14-17]. Наличие в составе горючих сланцев керогена (полимерного органического материала, являющегося одной из форм нетрадиционной нефти) повышает адгезию вяжущего к поверхности минерального материала. За счёт этого повышается прочность и водостойкость асфальтобетона.

Предлагается модифицирование вяжущего цеолитом [18-20]. Введение цеолита в гудрон повышает количество асфальтенов, что повышает прочность буроугольных брикетов, сформованных из отходов угольных предприятий. Схожая кинетика формирования, вяжущего для брикетирования бурых углей, позволяет сделать предположение о возможности применения данной технологии при производстве асфальтобетонов.

Применение противогололёдных добавок для полной или частичной замены традиционного минерального порошка в асфальтобетонной смеси позволит повысить безопасность дорожного движения в зимний период без ухудшения основных свойств асфальтобетона [21, 22].

Ряд исследователей [23] предлагает использовать в качестве сырья для производства минерального порошка сапропель.

Для Ярославской области изучение возможности использования сапропеля в дорожном строительстве является актуальной задачей, т.к. на территории области имеется уникальное озеро Неро, запасы сапропеля в котором превышает 250 млн кубических метров.

Приблизительные размеры озера – 13х8 километров, общая площадь водного бассейна чуть более 51 квадратного километра. Одной из интересных особенностей озера является огромное количество сапропелей, расположенных на его дне. Современные исследователи полагают, что в далеком прошлом максимальная глубина здесь была 25-35 метров [24].

На сегодняшний день она составляет около четырех метров. А разница между этими значениями – толщина слоя сапропелей. Что же касается среднего значения глубины, то оно составляет порядка 1,3 метра [24].

Сапропель представляет собой природный органоминеральный комплекс веществ. Содержит гуминовые кислоты, фульвокислоты, целлюлозу, битумы, золу. В зависимости от содержания золы различают малозольный, среднезольный и высокозольный сапропель. Специалисты выделяют четыре типа сапропелей (по



преобладающему компоненту) – карбонатный, железистый, кремнеземистый и органический [25].

Детальная разведка месторождения сапропелей оз. Неро была выполнена геологопоисковой партией треста "Геолторфразведка" в 1974-1975 годах. Изысканиями было установлено, что сапропелевые отложения озера Неро распространены на площади 5308 га и имеют запас 169309 тыс. м³, или 107795 тыс. т в пересчете на 60% условную влажность. Средняя мощность отложения сапропеля - 3,19 м, наибольшая - 7,4 м.

По содержанию и составу органического и минерального вещества сапропелевые отложения озера подразделены на четыре вида: глинистый, водорослево-железистый, водорослево-известковый и известковый.

Глинистый сапропель занимает три четверти площади озера (73% площади). В прибрежной зоне он расположен небольшой мощностью до 0,9 м в верхних слоях пласта. На юго-западе озера и узкой полосой вдоль берега глинистый сапропель залегает на всю толщу и достигает глубины до 2,8 м. Запас глинистого сапропеля на площади 3854 га равен 33144 тыс. м³ (забалансовые запасы), что составляет 19,6% от общего запаса сапропеля.

Содержание органических веществ (остатки водорослей и живых организмов) у этого вида сапропелей колеблется от 9,4 до 32,27%; зольность - от 67,73 до 90,6% (глина, известь, песок).

Водорослево-железистый сапропель расположен в центральной части озера на площади 1347 га (25% площади). Средняя глубина - 1,08 м. Максимальная мощность отложения - 2,9 м. Запас 14548 тыс. м³, или 8,6% от общего запаса. Залегает он преимущественно в верхних слоях пласта, лишь на небольшой площади в восточной и северо-восточной частях залежи водорослево-железистого сапропеля перекрыты железистым сапропелем.

Содержание органических веществ у этого вида сапропелей колеблется от 28,21 до 36,53%; зольность - от 63,47 до 71,79%.

Водорослево-известковый сапропель самый распространенный на озере вид сапропеля. Расположен почти на всей площади озера - 3529 га. Средняя глубина - 2,0 м. Мощность отложений колеблется от 1,0 до 5,0 м. Запасы - 70567 тыс. м³, или 41,6% от общего запаса на месторождении. Залегает водорослево-известковый сапропель в основном в средних слоях сапропелевых отложений. Среди отложений этого вида сапропеля на разных глубинах встречаются прослойки известкового, известково-глинистого и глинистого сапропелей мощностью 0,2-0,5 м.

В минеральную часть входят известь, глина и частично песок. Содержание органических веществ у этого вида сапропелей колеблется от 12,42 до 23,17%; зольность - от 76,83 до 87,58%.

Известковый сапропель также очень широко распространен на озере. Общая площадь, занятая этим сапропелем, равна 2530 га, глубина - 2,02 м. Запас - 51050

тыс. м³, или 30,2% от общего запаса сапропеля. Распространен по площади озера отдельными контурами. Всего выделено 6 контуров. Самый большой контур расположен в западной части озера.

Залегает известковый сапропель в нижних слоях отложений. В пластах известкового сапропеля встречаются прослойки водорослево-известкового сапропеля мощностью до 0,5 м.

В минеральную часть входят известь, глина, песок. На долю извести приходится 40-65% минеральной части.

Содержание органических веществ в известковых сапропелях самое низкое и колеблется от 1-2 до 16,3%; зольность - от 83,7 до 91,58%.

Анализируя состав видов сапропеля озера, можно сделать вывод, что для производства минерального порошка из сапропеля оз. Неро возможно использование сапропелей с низким содержанием органики, таких как глинистый сапропель, водорослево-известковый сапропель, известковый сапропель.

Озеро Неро постепенно заполняется сапропелевыми отложениями. Озеро медленно, но верно мелеет. С каждым годом уменьшается количество рыбы и исчезает съедобный планктон. Озеро «умирает» – такой диагноз поставили ученые, состояние водоема почти критическое [26].

Суммируя все вышесказанное, можно сделать вывод, что единственный путь спасения озера Неро – полная его реконструкция путем удаления донных отложений. Рис. № – название рисунка

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На сегодняшний день информации о реализации каких-либо проектов по реконструкции озера Неро нет, но другого варианта по его «спасению» просто не существует. Учитывая тот факт, что не все сапропели оз. Неро пригодны для использования в сельском хозяйстве как удобрения или мелиоранты почв, целесообразно проведение дальнейших исследований по расширению направлений его использования. Одним из таких направлений может быть дорожное строительство. Учитывая всё вышеизложенное, было принято решение о проведении научных исследований по использованию сапропеля оз. Неро при производстве асфальтобетонных смесей.

Для сравнения, были изготовлены образцы с использованием активированного и неактивированного сапропеля. Активация осуществлялась его обжигом с последующим помолом. Получившаяся асфальтобетонная смесь должна соответствовать требованиям, предъявляемым к асфальтобетону для нижнего слоя покрытия согласно ГОСТ 9128-2013.

При проведении научных исследований использовалось следующее оборудование: набор стандартных сит (размеры отверстий 11,2; 8; 4; 0,125 мм) с поддоном и



крышкой для разделения материалов на необходимые фракции; виброплощадка ВПУ-Ф для более эффективного просеивания материалов через сита; весы с точностью взвешивания до 0,01 г для определения массы необходимых компонентов асфальтобетонной смеси; фарфоровая ступка и пестик для измельчения минерального порошка из сапропеля; сушильный шкаф УТ-4610 [25] (для приготовления горячей асфальтобетонной смеси); лабораторная электропечь СНОЛ 1.6.2.5.1/11-М1 для обжига минерального порошка из сапропеля; формы для уплотнения асфальтобетонных образцов; вакуумная установка ФУТУРУМ для испытания асфальтобетонных

образцов на водонасыщение и водостойкость; пресс для уплотнения и определения предела прочности образцов при сжатии. Было изготовлено по три образца для каждой серии испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов определения объёмной плотности с требованием ГОСТ 9128-2013 представлено на рис. 1.

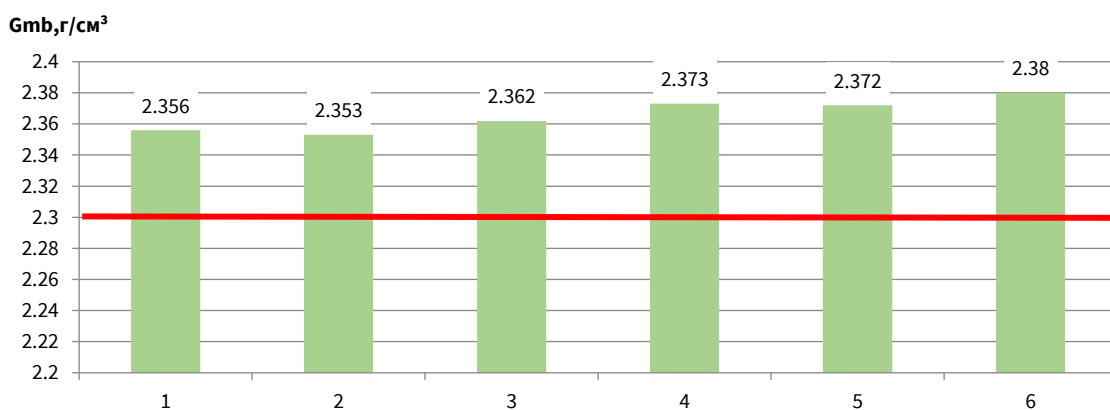


Рис. 1. Объёмная плотность образцов

Fig. 1. Bulk density of samples

Вывод: образцы с обожженным минеральным порошком из сапропеля (серии 4, 5, 6) имеют большую плотность. При этом показатели всех образцов отвечают требованиям ГОСТа (обозначено красной линией).

Сравнение результатов испытаний водонасыщения асфальтобетонных образцов с требованием ГОСТ 9128-2013 представлено на рис. 2.

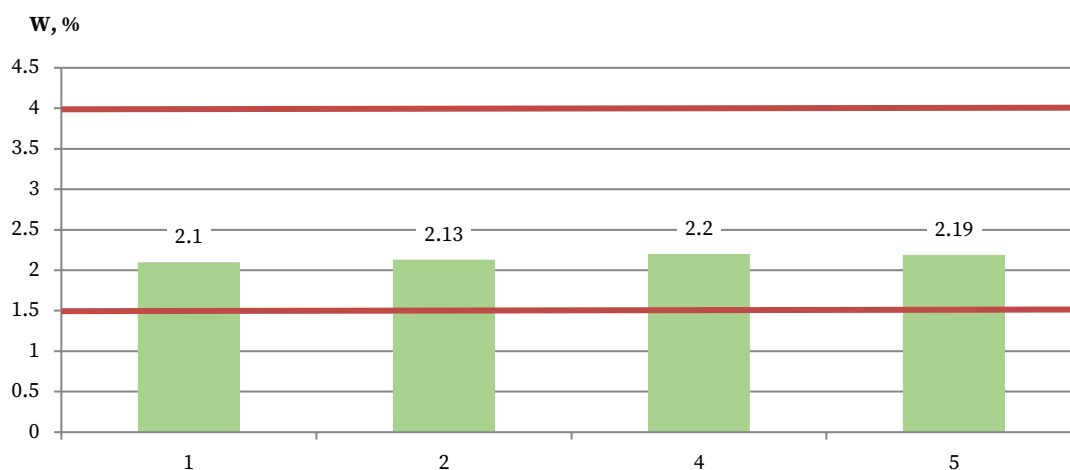


Рис. 2. Водонасыщение образцов

Fig. 2. Water saturation of samples



Вывод: водонасыщение серии образцов 1, 2 (с необожженным сапропелем) не имеет значительных отличий от водонасыщения образцов серии образцов 4, 5 (с обожженным сапропелем). При этом показатели всех образцов отвечают требованиям ГОСТа (обозначено красной линией).

Сравнение результатов испытаний прочности асфальтобетонных образцов с требованием ГОСТ 9128-2013 представлено на рис. 3.

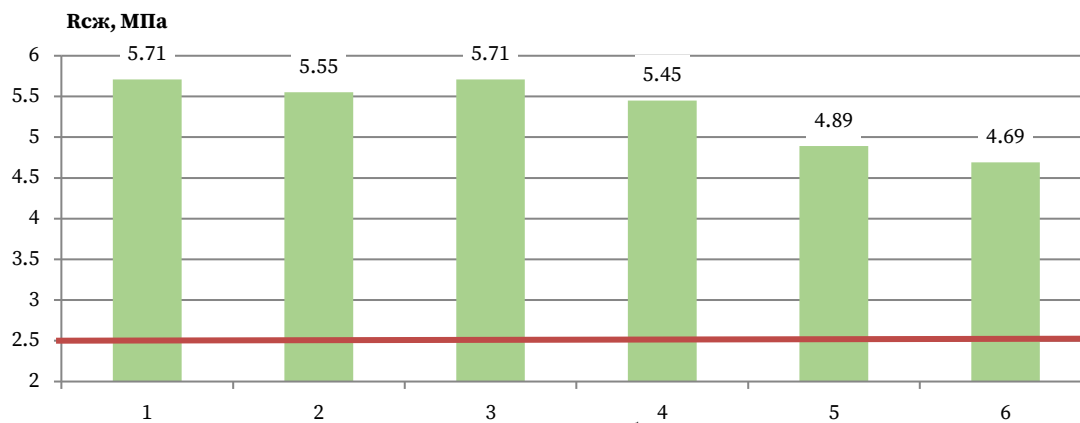


Рис. 3. Предел прочности образцов при сжатии

Вывод: серии образцов с необожженным минеральным порошком (1, 2, 3) показали большую прочность при сжатии. При этом показатели всех образцов отвечают требованиям ГОСТа (обозначено красной линией).

отвечают требованиям ГОСТа (обозначено красной линией).

Сравнение результатов испытаний асфальтобетонных образцов по коэффициенту водостойкости с требованием ГОСТ 9128-2013 представлено на рис. 4.

Сравнение результатов испытаний прочности асфальтобетонных образцов с требованием ГОСТ 9128-2013 представлено на рис. 3.

K_B

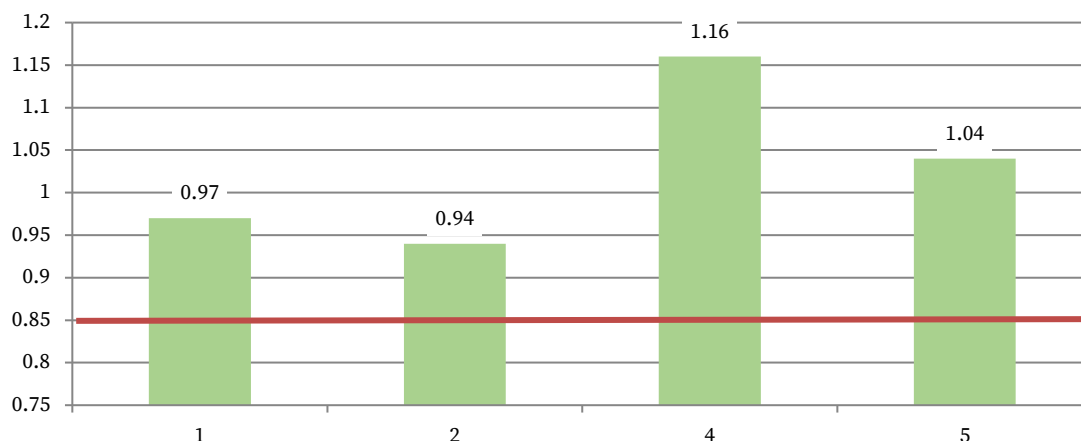


Рис. 4. Водостойкость образцов
Fig. 4. Water resistance of samples

Вывод: серии образцов с обожженным минеральным порошком (4, 5) показали большую водостойкость. При

этом показатели всех четырех образцов отвечают требованиям ГОСТа (обозначено красной линией).



ВЫВОДЫ

В результате выполнения первого этапа экспериментальных исследований данной работы можно сделать следующие выводы:

- предложенный состав асфальтобетонной смеси с минеральным порошком из сапропеля предварительно может использоваться в качестве нижнего слоя покрытия дорожной одежды;
- образцы асфальтобетонной смеси по объемной плотности, водонасыщению, водостойкости и пределу прочности при сжатии отвечают требованиям ГОСТ 9128-2013. Стоит отметить, что испытуемые образцы в два раза превысили допустимый предел прочности при сжатии, что является хорошей предпосылкой для использования минерального порошка из сапропеля;
- по проведенным экспериментальным исследованиям видно, что обжиг минерального порошка не привел к существенному улучшению характеристик асфальтобетона. В дальнейшем, при производстве асфальтобетонной смеси с таким составом, нет необходимости обжигать минеральный порошок, так как это ведет к удорожанию смеси, а прочностные характеристики не изменяются. Возможно, образцы с обожженным минеральным порошком покажут лучшие характеристики при проведении других дополнительных экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Котлярский Э.В.** Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: учеб. пособие. М.: МАДИ (ГТУ). 2004. 192 с.
2. **Горельшев Н.В.** Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы. М.: Можайск-Терра. 1995. 176 с.
3. **Турбин В.С., Лаврухин В.П.** Получение активированного минерального порошка из золошлаковых отходов ТЭЦ для приготовления асфальтобетона. *Строительные материалы*. 1993. № 2. С. 20-21.
4. **Пугин К.Г.** Использование отходов металлургии в асфальтобетонах. *Строительные материалы*. 2011. № 10. С. 26-27.
5. **Аминов Ш.Х., Струговец И.Б., Ханнанова Г.Т., Недосеко И.В., Бабков В.В.** Использование пиритного огарка в качестве минерального наполнителя в асфальтобетонах. *Строительные материалы*. 2007. № 9. С. 42-43.
6. **Ярмолинская Н.И.** Дорожный асфальтобетон с применением минеральных порошков из техногенных отходов промышленности: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2007. 337 с.
7. **Лебедев М.С., Строкова В.В., Жерновский И.В., Потапова И.Ю.** Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации. *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 68-70.
8. **Лебедев М.С., Жерновский И.В., Фомина Е.В., Фомин А.Е.** Особенности использования глинистых пород при производстве строительных материалов. *Строительные материалы*, 2015. № 9. С. 67-71.
9. **Подрез Г.А., Битуев А.В., Заяханов М.Е., Мангутов А.Н., Прокопец В.С.** Применение местных эффузивных горных пород для производства асфальтобетона. *Строительные материалы*. 2009. № 5. С. 36-38.
10. **Прокопец В.С., Галдина В.Д., Подрез Г.А.** Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири. *Строительные материалы*. 2009. № 11. С. 26-28.
11. **Прокопец В.С., Галдина В.Д., Надыкто Г.И., Подрез Г.А.** Физико-механические и деформативные свойства асфальтобетонов на пористом заполнителе. *Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал*. 2009. Вып. 2(12). С. 39-43.
12. **Прокопец В.С., Галдина В.Д., Подрез Г.А.** Оптимизация рецептурных и технологических факторов при изготовлении битумо-минеральных композиций на пористом заполнителе. *Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал*. 2012. Вып. 2(24). С. 57-63.
13. **Подрез Г.А., Битуев А.В., Заяханов М.Е.** Возможность замены стабилизирующих добавок в щебеночно-мастичном асфальтобетоне на местные материалы из эффузивных горных пород. *Материалы I Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск, 2008. С. 86-89.
14. **Галдина В.Д., Гурова Е.В., Кривонос О.И., Терехова Е.Н., Плаксин Г.В., Райская Е.А.** Минеральные порошки из горючих сланцев. *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2015. № 2. С. 20-24.
15. **Галдина В.Д., Гурова Е.В., Кривонос О.И., Терехова Е.Н., Плаксин Г.В.** Пути использования горючих сланцев Оленекского месторождения в дорожном строительстве. *Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ»*. Омск: СибАДИ. 2013. Т. 2. С. 40-43.
16. **Галдина В.Д., Гурова Е.В.** Исследование горючих сланцев как сырья для производства минеральных порошков. Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки. Материалы международной научно-практической конференции. 15-16 декабря 2014 г, г. Омск [Электронный ресурс]. Омск: СибАДИ. 2014. Т. 3. С. 17-21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22725413&pff=1>
17. **Галдина В.Д., Гурова Е.В., Кривонос О.И., Плаксин Г.В.** Асфальтобетоны на основе минеральных материалов из твердых углеродсодержащих продуктов горючих сланцев. *Развитие дорожно-транспортного и*



строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки. *Материалы международной научно-практической конференции 15-16 декабря 2014 г., г. Омск* [Электронный ресурс]. Омск: СибАДИ. 2014. Т. 3. С. 14-17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22725388&pff=1>

18. **Николаева Л.А., Буренина О.Н.** Особенности брикетирования бурых углей Ленского бассейна. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 3. С. 168-174.
19. **Попов С.Н., Заровняев Б.Н., Буренина О.Н., Николаева Л.А.** Особенности брикетирования бурых углей Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2 14. № 9. С. 405-412.
20. **Николаева Л.А., Латышев В.Г., Буренина О.Н.** Топливные брикеты из бурых углей Якутии. *Химия твердого топлива*. 2009. № 2. С. 55-59.
21. **Дудин В.М., Окутин А.Э., Смекалов Н.С.** Повышение безопасности асфальтобетонного покрытия. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. Вып. 2. С. 56-68. URL: <http://comincon.ru/index.php/tor/article/view/33>
22. **Смирнов А.В., Дудин В.М.** Влияние содержания противогололёдной добавки на основные свойства асфальтобетона. Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 21 апреля 2021 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 2 ч. Ч. 2. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2021. С. 415-419. 1 CD-ROM. Текст: электронный.
23. **Смекалов Н.С., Окутин А.Э., Дудин В.М.** Совершенствование составов асфальтобетонных смесей при использовании нетрадиционных минеральных порошков. *Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием*. 21 апреля 2021 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 2 ч. Ч. 2. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2021. С. 407-411. 1 CD-ROM. Текст: электронный.
24. Озеро Неро. URL: <https://wikiway.com/russia/ozero-nero/>
25. **Климовицкий М.Л., Майоров И.М., Хохлов Б.Н., Малышков Л.С., Дудин В.М.** Сапропель озера Неро – уникальный источник богатства земли Ярославской. Ярославль: Верхне-Волжский региональный центр РАЕН. 1999. 84 с.
26. **Бикбулатов Э.С., Литвинов А.С.** Необходимость и целесообразность реконструкции экосистемы оз. Неро. *Доктор ЯРО: Экоцентр*. URL: <http://doctor-yaro.ru/archives/378#.Xox-UvkzacM>

Поступила в редакцию 08.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

1. **Kotlyarsky E.V.** Construction and technical properties of road asphalt concrete. M.: MADI (GTU). 2004. 192 p. (in Russian).
2. **Gorelyshev N.V.** Asphalt concrete and other bitumen-mineral materials. M.: Mozhaysk-Terra. 1995. 176 p. (in Russian).
3. **Turbin V.S., Lavrukhin V.P.** Obtaining activated mineral powder from ash and slag waste of thermal power plants for the preparation of asphalt concrete. *Stroitel'nye materialy*. 1993. N 2. P. 20-21 (in Russian).
4. **Pugin K.G.** The use of metallurgical waste in asphalt concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2011. N 10. P. 26-27 (in Russian).
5. **Aminov Sh.Kh., Strugovets I.B., Khannanova G.T., Nedoroseko I.V., Babkov V.V.** The use of pyrite stub as a mineral filler in asphalt concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2007. N 9. P. 42-43 (in Russian).
6. **Yarmolinskaya N.I.** Road asphalt concrete with the use of mineral powders from technogenic industrial waste: textbook. Manual. 2nd ed., reprint. and add. Khabarovsk: Izdvo Tihookean. gos. un-ta. 2007. 337 p. (in Russian).
7. **Lebedev M.S., Strokova V.V., Zhernovskiy I.V., Potapova I.Yu.** Changing the properties of mineral powders from aluminosilicate raw materials under the influence of thermal modification. *Stroitel'nye materialy*. 2012. N 9. P. 68-70 (in Russian).
8. **Lebedev M.S., Zhernovskiy I.V., Fomina E.V., Fomin A.E.** Features of the use of clay rocks in the production of building materials. *Stroitel'nye materialy*. 2015. N 9. P. 67-71 (in Russian).
9. **Podrez G.A., Bituev A.V., Zayakhanov M.E., Mangutov A.N., Prokopets V.S.** The use of local effusive rocks for the production of asphalt concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2009. N 5. P. 36-38 (in Russian).
10. **Prokopets V.S., Galdina V.D., Podrez G.A.** Asphalt concretes based on porous aggregates of Western and Eastern Siberia. *Stroitel'nye materialy*. 2009. N 11. P. 26-28 (in Russian).
11. **Prokopets V.S., Galdina V.D., Nadykto G.I., Podrez G.A.** Physico-mechanical and deformative properties of asphalt concrete on a porous aggregate. *Vestnik SibADI: Nauchnyj recenziruemiy zhurnal*. 2009. Iss. 2 (12). P. 39-43 (in Russian).
12. **Prokopets V.S., Galdina V.D., Podrez G.A.** Optimization of prescription and technological factors in the manufacture of bitumen-mineral compositions on a porous aggregate. *Vestnik SibADI: Nauchnyj recenziruemiy zhurnal*. 2012. Iss. 2 (24). P. 57-63 (in Russian).
13. **Podrez G.A., Bituev A.V., Zayakhanov M.E.** The possibility of replacing stabilizing additives in crushed-mastic asphalt concrete with local materials from effusive rocks. *Materialy I Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Yakutsk. 2008. P. 86-89 (in Russian).



14. **Galdina V.D., Gurova E.V., Krivonos O.I., Terekhova E.N., Plaksin G.V., Raikaya E.A.** Mineral powders from oil shales. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2015. N 2. P. 20-24 (in Russian).
15. **Galdina V.D., Gurova E.V., Krivonos O.I., Terekhova E.N., Plaksin G.V.** Ways of using oil shales of the Olenekskoye field in road construction. *Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tekhnologii. Innovacii: Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. Omsk: SibaDI. 2013. P. 40-43 (in Russian).
16. **Galdina V.D., Gurova E.V.** Research of oil shales as raw materials for the production of mineral powders. *Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoenie strategicheskikh vazhnykh territoriy Sibiri i Arktiki: vklad nauki. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii*. 15-16 dekabrya 2014 g, g. Omsk [Elektronnyy resurs]. Omsk: SibaDI. 2014. P. 17-21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22725413&pff=1> (in Russian).
17. **Galdina V.D., Gurova E.V., Krivonos O.I., Plaksin G.V.** Asphalt concretes based on mineral materials from solid carbon-containing products of oil shale. *Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoenie strategicheskikh vazhnykh territoriy Sibiri i Arktiki: vklad nauki. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii*. 15-16 dekabrya 2014 g, g. Omsk [Elektronnyy resurs]. Omsk: SibaDI. 2014. P. 14-17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22725388&pff=1> (in Russian).
18. **Nikolaeva L.A., Burenina O.N.** Features of briquetting brown coals of the Lena basin. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012. N 3. P. 168-174 (in Russian).
19. **Popov S.N., Zarovnyaev B.N., Burenina O.N., Nikolaeva L.A.** Features of briquetting brown coals of Yakutia. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2014. N 9. P. 405-412 (in Russian).
20. **Nikolaeva L.A., Latyshev V.G., Burenina O.N.** Fuel briquettes from brown coals of Yakutia. *Khimiya tverdogo topliva*. 2009. N 2. P. 55-59 (in Russian).
21. **Dudin V.M., Okutin A.E., Smekalov N.S.** Improving the safety of asphalt concrete pavement. *Smart composites in construction*. 2021. V. 2. N 2. P. 56-68. URL: <http://comin-con.ru/index.php/tor/article/view/33> (in Russian).
22. **Smirnov A.V., Dudin V.M.** Influence of the content of anti-ice gouging on the olefin properties of asphalt concrete. *Sem'desyat chetvertaya vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, magistrantov i aspirantov vysshikh uchebnykh zavedeniy s mezhdunarodnym uchastiem*. 21 aprelya 2021 g., Yaroslavl': sb. materialov konf. V. 2 ch. CH. 2. Yaroslavl': Izd-vo YAGTU, 2021. P. 415-419. 1 CD-ROM. Tekst: elektronnyy (in Russian).
23. **Smekalov N.S., Okutin A.E., Dudin V.M.** Improvement of the compositions of asphalt concrete mixtures when using non-traditional mineral powders. *Sem'desyat chetvertaya vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, magistrantov i aspirantov vysshikh uchebnykh zavedeniy s mezhdunarodnym uchastiem*. 21 aprelya 2021 g., Yaroslavl': sb. materialov konf. V. 2 ch. CH. 2. Yaroslavl': Izd-vo YAGTU, 2021. P. 407-411. 1 CD-ROM. Tekst: elektronnyy (in Russian).
24. Lake Nero. URL: <https://wikiway.com/russia/ozero-nero/> (in Russian).
25. **Klimovitsky M.L., Mayorov I.M., Khokhlov B.N., Malyshkov L.S., Dudin V.M.** Sapropel of Lake Nero – a unique source of wealth of the Yaroslavl land. Yaroslavl: Verhne-Volzhskiy regional'nyy centr RAEN. 1999. 84 p. (in Russian).
26. **Bikbulatov E.S., Litvinov A.S.** Necessity and expediency of reconstruction of the lake ecosystem. *Nero. Doktor YARO: Ekocentr*. URL: <http://doctor-yaro.ru/archives/378#.Xox-UvkzacM>

Received 08.09.2021

Accepted 20.09.2021



УДК 625.7/8

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ

Г.В. Проваторова

Галина Владимировна Проваторова

Кафедра «Автомобильные дороги», Владимирский государственный университет, ул. Горького, 87,
Владимир, Российская Федерация, 600000

E-mail: asf.inst@yandex.ru



Вопросы повышения качества дорожных битумов и влияние свойств вяжущего на эксплуатационные показатели асфальтобетона являются в последние годы весьма актуальными. Исследования, проводимые на кафедре автомобильных дорог Владимирского госуниверситета, показали, что даже наиболее эффективные модифицирующие добавки, применяемые в дорожном строительстве, не всегда дают требуемый результат, или результат достигается введением значительного количества модификатора, что дает заметное удорожание вяжущего и асфальтобетона на его основе.

Целью данной работы является выбор нового (ранее не использовавшегося в области) модификатора для битумов, применяемого в дорожных организациях Владимирской области, и исследование его свойств. По результатам эксперимента была разработана методика проведения опытных испытаний, определены свойства полученного модифицированного вяжущего и выполнено сравнение со свойствами исходных образцов и подбор состава добавок, формование и испытание образцов на полученном модифицированном вяжущем. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что примененный модификатор дает лучшие показатели, нежели ранее применяемые модификаторы.

Ключевые слова: дорожный битум, модификатор, наномодификатор, углеродные нанотрубки, колейность, трещиностойкость

Для цитирования:

Проваторова Г.В. Применение наномодификаторов для повышения качества дорожных битумов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 68-76 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_68



UDC 625.7/8

NANOMODIFIERS IN PRODUCING HIGHER QUALITY PAVING ASPHALT

G.V. Provatorova

Galina V. Provatorova

Department of Automobile Roads, Vladimir State University, Gorkogo st., 87, Vladimir, 600000, Russia

E-mail: *asf.inst@yandex.ru*



Recently it has become quite important to improve the quality of paving asphalt and study the influence of the properties of the binder on the asphalt concrete performance. Research conducted at the Department of Highways of Vladimir State University has shown that even the most effective modifying additives used in road construction do not always give the required result, or the result is achieved by introducing a significant amount of modifier, which gives a noticeable increase in the cost of binder and asphalt concrete that use it. The purpose of this work is to select a new (previously not used in the Vladimir region) modifier for bitumen used in road construction companies in the Vladimir region, and study its properties. The results of experiment were used to develop the procedure of experimental tests, determine the properties of obtained modified binder, compare with the properties of original samples, select additives composition, mold and test samples on the obtained modified binder. The results allowed us to conclude that the applied modifier gives better performance than the previously used modifiers.

Key words: paving asphalt, modifier, nanomodifier, carbon nanotubes, rutting, crack resistance, asphalt concrete

For citation:

Provatorova G.V. Nanomodifiers in producing higher quality paving asphalt. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 68-76 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_68



INTRODUCTION

Recently it has become quite important to improve the quality of paving asphalt and study the influence of the properties of the binder on the asphalt concrete performance. The problem is important mostly due to changes in the traffic composition. Significant increase in traffic and increase in axle loads of vehicles on the roads has led to the fact that asphalt concrete does not guarantee the required durability of road pavement. The durability of asphalt pavements is directly related to the quality of the materials used, primarily bitumen. Bitumen is most susceptible to change under the influence of transport loads and weather conditions. At the same time, bitumen largely determines the condition of the road surface. Bitumen behavior can be changed by modifying it with additives. The bitumen modifier can lead to a road coating resistant to cracking at low temperatures and fatigue at high temperatures. It also leads to rut resistance.

An important issue in selecting a modifier is the increased coating cost, as well as the cost of additional equipment, stability of the modified binder during storage and transportation, etc.

The purpose of this work is to develop a nano-modifier for bitumens used in road organizations in the Vladimir region, and to study its properties.

Recently, there has been a tremendous breakthrough worldwide in the production, study, and use of nanomaterials. Nanomaterials can act as modifiers of chemical reactions, technological and structural properties of materials they are added to [1].

Nanotechnological approaches lead to an increase in the competitiveness of Russian products, solving important problems of our time – energy saving and reducing the technogenic pressure of the building materials industry on the environment [2]. Modern trends in the development of nanodisperse modifiers cause a large and stable growth of other areas, including road material science [3].

Introduction of nanomodifying additives gives consumers the opportunity to increase strength and shear characteristics of road surfaces at elevated temperatures and improve the performance of road surfaces under traffic load with minor changes in the method of asphalt-concrete preparation.

Among carbon nanomaterials (CNMs), a special place belongs to carbon nanotubes (CNTs), which are 1–50 nm wide, several micrometers long, and form a new class of quasi-dimensional nanobjects. CNTs have several unique properties due to the ordered structure of their nanofragments. CNT-based materials can be successfully used as structural modifiers of construction materials [4]. The introduction of carbon nanotubes [5–8] into liquid bitumen significantly increases the durability and elasticity of the resulting asphalt coating.

It is important to note that due to the significant increase in the compressive strength index at +50°C, CNT in asphalt concrete mix can minimize the rutting of the road surface and

improve its performance in summer, while maintaining the plasticity and necessary characteristics in winter.

Carbon nanotubes are molecular compounds that are long cylindrical structures, one to several tens of nanometers in diameter and one to several micrometers in length. CNTs can consist of one or more layers, each of which represents a hexagonal mesh of graphite (graphene), embedded into each other or rolled up into a tube. The grid is based on hexagons with carbon atoms in the corners. In all cases, the distance between the layers is 0.34 nm, as in graphite. The upper ends of the tubes are often closed with hemispherical lids, each layer composed of hexagons and pentagons. Carbon nanotubes are formed by thermal sputtering of graphite electrode in arc discharge plasma burning in helium atmosphere [9–11, 14, 15].

EXPERIMENT

The purpose of investigation is, firstly, to determine an optimal amount of additive introduced into bitumen and study properties of obtained binder, secondly, to improve main indicators of asphalt concrete mix based on the modification without a significant increase in production cost, thirdly, to increase asphalt concrete mix service life, which in its turn will reduce road maintenance costs.

The main objective is to analyze the effectiveness of the modification effect on the change in bitumen characteristics and, consequently, the effect on the strength properties of asphalt concrete.

Carbon nanotubes were used as a modifier for asphalt mixtures in the first phase of work.

The study was conducted with BND 70/100, which is the most widely used bitumen in the Vladimir region at this time. The technology for the preparation of modified bitumen includes the following processes:

- 1) Loading the initial bitumen preheated to a given temperature (160–165 °C), in a laboratory mixer.
- 2) Injection of a pre-dosed number of nanotubes into heated bitumen.
- 3) Thorough mixing of the binder with the modifier in the mixing unit, simultaneously heating it until a homogeneous state is reached within 2 hours.

The binder study includes:

- testing of the initial petroleum road bitumen of a given grade (Table 1);
- testing of modified petroleum road bitumen prepared in a lab (Fig. 1);
- subsequent analysis of the obtained data (Table 2).

As the results of research show, modifying bitumen by introducing inorganic binders, such as carbon nanotubes, creates a strong link between the binder and the stone material, increases the bitumen softening temperature, preventing ruts on the asphalt concrete pavement. It also becomes possible to increase the transportation distance of asphalt-



concrete mixtures and extend the season of road works because it becomes possible to compact asphalt-concrete mixtures at a lower temperature.

During the experiment it was found that adding the modifier into the bituminous binder decreased Needle penetration

depth at 25 °C and increased Softening point along the circle and ball and Dynamic viscosity at 60 °C. It should also be noted that cohesion and adhesion to mineral materials and resistance to oxidation and aging increases. The results are shown in Table 2.

Table 1. Test results of BND 70/100 grade bitumen

No. of item	Indicator name, unit of measurement	Test method	GOST normal values	Real value
1	Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	GOST 33136	71–100	75
2	Softening point along the ring and ball, °C	GOST 33142	at least 47	57.0
3	Stretchability at 0 °C, cm: - at 1 cm/min - at 5 cm/min	GOST 33138	at least 3.7	3.91 3.80
4	Maximum tensile force at 0 °C, N: - at 1 cm/min - at 5 cm/min	GOST 33138		77.1 142.6
5	Brittle temperature, °C	GOST 33143	at most -18	-20
6	Flash point, °C	GOST 33141	at least 230	230

Table 2. Test results of bitumen grade BND 70/100+UN T

No. of item	Indicator name, unit of measurement	Test method	GOST normal values	Real value
1	Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	GOST 33136	71–100	71
2	Softening point along the ring and ball, °C	GOST 33142	at least 47	54.1
3	Stretchability at 0 °C, cm: - at 1 cm/min - at 5 cm/min	GOST 33138	at least 3.7	4.20 3.88
4	Maximum tensile force at 0 °C, N: - at 1 cm/min - at 5 cm/min	GOST 33138		77.9 161.3
5	Brittle temperature, °C	GOST 33143	at most -18	-22
6	Flash point, °C	GOST 33141	at least 230	230

The next step is the asphalt concrete mixture formulation which includes choosing the asphalt concrete grain composition and the optimal amount of bitumen (Table 3) followed by shaping and testing the manufactured samples.

Asphalt concrete mix A 16Vn was chosen for the base. Initially, the mineral asphalt mixture was selected, and then the optimum amount of initial bitumen and modified bitumen was determined.

Asphalt mixtures were based on the same granulometric composition. One series of samples was prepared on the

original BND 70/100 grade bitumen, the second series used the modified CNT bitumen.

The following processes are included in the asphalt mixture preparation technology:

1. Preparation of asphalt concrete mixture based on the initial binder – BND 70/100 grade bitumen in the mixing unit in the lab.
2. Preparation of asphalt-concrete mixture based on the obtained modified binder in a mixing unit in the lab.



3. Production of laboratory samples of a given size in the required quantity for the study (Fig. 2).
4. Testing of the obtained samples (Fig. 3).
5. Results analysis

Table 3. Selection of the composition of asphalt concrete mixture A 16Vn

Complete passes, %	Grain size, mm, at most							Amount of binder (over 100%)
	22.4	16	11.2	4	2.0	0.125	0.063	
Grain composition acc. to GOST R 58406.2-2020	100	90-100	70-85	37-58	25-40	7-20	5-10	-
Grain composition acc. to the recipe	100	98.7	75.8	49.0	36.9	9.5	7.7	5.1
Grain composition, real BND 70/100	100	97.11	79.77	53.16	37.17	11.00	8.10	5.1
Grain composition, real BND 70/100 + CNT	100	97.44	77.52	52.55	38.84	10.66	8.04	5.0
*Values			±5.0	±5.0	±5.0	±3.0	±3.0	±0.4

Note: *- maximum permissible deviations of individual parameters from the recipe.



Fig. 1. Testing of bitumen grade BND 700/100

The research was using samples from asphalt-concrete mixture of the specified type based on oil road bitumen of the specified grade, as well as samples from asphalt-concrete mixture of the same type based on modified bituminous binder. This was followed by the analysis of the obtained results.

The experiment revealed a significant improvement in the main parameters of the asphalt mixtures, and the results showed maximum permissible deviations in the amount of binder in the asphalt mixture and in the main parameters. Moreover, the most important thing that has been achieved is a significant increase in rut resistance when rolling a loaded wheel (see Fig. 3).



Fig. 2. Production of asphalt concrete samples

RESULTS

Based on the data obtained, it can be concluded that with the help of bitumen modification, it is possible to solve a number of problems arising during the construction of asphalt concrete layers and during the operational phase of the road surface.

The tests of the molded samples of asphalt concrete revealed a significant improvement in the main parameters of the asphalt mixtures, and the results stayed within maximum permissible deviations in the amount of binder in the asphalt mixture and in the main parameters. And the most important thing that has been achieved is a significant increase in rut resistance by rolling a loaded wheel [13].

Test results of asphalt-concrete mixtures A16Vn are given in Table 4.



Table 4. Test results of asphalt concrete mixture A 16 Vn. Key indicators

Names of indicators	Unit of meas.	Maximum permissible deviations of individual values from the recipe	GOST requirements R 58406.2-2020	Results proj.	Actual results BND 70/100	Actual results BND 70/100 + CNT
Bulk density	g/cm ³	-	-	2.695	2.692	2.706
air voids content	%	± 1.2	2.5-4.5 incl.	3.0	3.24	3.01
Voids in Mineral Aggregate (VMA)	%	-	at least 12.0	14.7	14.8	14.3
Voids filled with bitumen binder (VBB)	%	-	67-80	79.9	78.14	78.95
Average track depth	mm	-	at most 4.5	1.5	3.23	1.3
Water resistance		-	at least 0.85	0.87	0.87	0.87
Maximum density	g/cm ³	-	-	2.777	2.782	2.790



Fig. 2. Production of asphalt concrete samples Fig. 3. Testing of asphalt concrete samples according to GOST R 58406.2-2020

CONCLUSIONS

Carbon nanotubes can be used to create a new composite material with unique properties and characteristics, which will ensure its use in the production of high-quality and reliable in operation systems and materials. Carbon nanotubes, which have close to the best mechanical properties, are considered as an effective means to improve the strength properties of composite polymeric materials. Nanotubes introduced into the asphalt mixture reinforce it, turning it into a composite material. Nanotubes behave like a network or matrix that binds the entire asphalt mixture together [4].

During the research:

1) The possibility of using inorganic binders as road bitumen modifiers has been proved.

2) Introduction of 2% of carbon nanotubes into road bitumen has yielded an organic binder with the improved operational properties.

The use of asphalt concrete on modified bitumen will increase the service life by 5 years, as well as reduce the cost of road maintenance by road organizations.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Косолапов А.В.** Применение нанотехнологий в строительстве. URL: <http://www.naars.ru>.
2. **Вихрев А.В., Проваторова Г.В., Демехин Е.Ф., Варзин Е.И.** Пути повышения качества органоминеральных смесей. *Международная научная конференция «SPbWOSCE. Энергоэффективность и устойчивое развитие в гражданском строительстве» 16-17 ноября 2017 года.*
3. **Handelsman. I., Zakrevskay L., Provatorova G.** The influence of modified binders on the technological and operational properties of composite building materials. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) electronic edition. «MATEC Web of Conferences».* 2018. V. 245. N 8.
4. **Мищенко С.В., Ткачев А.Г.** Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. М: Машиностроение. 2008. 320 с.
5. **Запороцкова И.В.** Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе: строение и электронные свойства. Волгоград: ВолГУ. 2009. 490 с.



6. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.mintrans.ru/documents/detail>
7. Харрис П. Углеродные нанотрубки и связанные с ними структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера. 2003. 364 с.
8. Барщевский А.Я., Иоффе И.Н., Сидоров Л.Н., Троянов С.И., Юровская М.А. Нанотехнологическое сообщество Нанометр. 2007. URL: <http://www.nanometer.ru>
9. Булярский С.В. Углеродные нанотрубки: технология, управление недвижимостью, применение. Ульяновск: ООО "Стрежень". 2011. 478 с.
10. ГОСТ 33133-2014. Технические требования к дорожным вязким битумам общего пользования. М.: Стандартиформ. 2019.
11. ГОСТ 58406.2-2020. Автомобильные дороги общего пользования. Смеси горячего асфальтобетона и асфальтобетона. Технические условия (утверждены и введены в действие Приказом Росстандарта от 15.05.2020 N 192-ст). М.: Стандартиформ. 2020.
12. Shafabakhsh G.H., Sajadib S.R. *Evaluation of rheological behaviour of bitumen modified with Nano Copper Oxide. International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. N 7(4). P. 13-18.
13. Gaus A., Darwis M., Imran. *Influence of hot asphalt mixture using asbuton on road composite pavement. AIP Conference Proceedings*. (American Institute of Physics Inc.). 2017. V. 1903. 050007.
6. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. URL: <http://www.mintrans.ru/documents/detail> (in Russian).
7. Harris, P. Carbon nanotubes and related structures. New materials of the XXI century. M.: Technosphere. 2003. 364 p. (in Russian).
8. Barshchevsky A.Ya., Ioffe I.N., Sidorov L.N., Troyanov S.I., Yurovskaya M.A. Nanotechnological community Nanometer. 2007. URL: <http://www.nanometer.ru>, free (in Russian).
9. Bulyarskiy S.V. Carbon nanotubes: technology, property management, application. Ulyanovsk: LLC «Strezhen». 2011. 478 p. (in Russian).
10. GOST 33133-2014. Public roads Oil bitumen road viscous technical requirements. M.: Standartinform. 2019 (in Russian).
11. GOST 58406.2-2020. Public automobile roads. Mixtures of hot asphalt concrete and asphalt concrete. Technical conditions (approved and put into effect by the Order of Rosstandart of 15.05.2020 N 192-st). M.: Standartinform. 2020 (in Russian).
12. Shafabakhsh G.H., Sajadib S.R. *Evaluation of rheological behavior of bitumen modified with Nano Copper Oxide. International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. N 7(4). P. 13-18.
13. Gaus A., Darwis M., Imran. *Influence of hot asphalt mixture using asbuton on road composite pavement. AIP Conference Proceedings*. (American Institute of Physics Inc.). 2017. V. 1903. 050007.

Поступила в редакцию 20.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

Received 20.09.2021

Accepted 20.09.2021

REFERENCES

1. Kosolapov A.V. Application of nanotechnologies in construction. URL: <http://www.naars.ru> (in Russian).
2. Vikhrev A.V., Provatorova G.V., Semekhin E.F., Varzin E.I. Ways to improve the quality of organomineral mixtures. Mezhdunarodnayanayachnaya konferenciya «SPbWOSCE. Energoeffektivnost' iustojchivoerazvitie v grazhdanskomstroitel'stve» 16-17 noyabrya 2017 goda (in Russian).
3. Handelsman, I., Zakrevskay L., Provatorova G. The influence of modified binders on the technological and operational properties of composite building materials. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018)* electronic edition. «MATEC Web of Conferences». 2018. V. 245. N 8.
4. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Carbon nanomaterials. Production, properties, application. M.: Mashinostroenie. 2008. 320 p. (in Russian).
5. Zaporotskova I.V. Carbon nanomaterials for road construction. Volgograd: VolGU. 2009. 469 p. (in Russian).



УДК 72.03

ПОСЕЛОК ЗАВОДА СИНТЕТИЧЕСКОГО КАУЧУКА В ЯРОСЛАВЛЕ – АВАНГАРДНЫЙ ТИП СОВЕТСКОГО ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Н.С. Сапрыкина

Наталья Сергеевна Сапрыкина

Кафедра «Градостроительство», Академия МУБиНТ, ул. Советская, 80, Ярославль, Российская Федерация, 150999

E-mail: saprykinans@edu.mubint.ru



В 1932–1934 гг. в г. Ярославле параллельно со строительством завода синтетического каучука возводится новый жилой комплекс («соцпоселок») для его рабочих и служащих. На его примере рассматривается специфика организации советского рабочего поселка сквозь призму основных принципов и установок государственной градостроительной политики второй половины 1920-х гг. В статье ставится задача доказать, что данное градостроительное образование – характерный типологический образец советского времени, иллюстрирующий доктрину советского рабочего поселка. Публикуются новые сведения по истории градостроительства советского периода г. Ярославля.

Ключевые слова: градостроительство, архитектура, Ярославль, конструктивизм, проект, тип, советский, социалистический, рабочий поселок, квартал, образец

Для цитирования:

Сапрыкина Н.С. Поселок завода синтетического каучука в Ярославле – авангардный тип советского градостроительного образования. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 77-86 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_77



UDC 72.03

SETTLEMENT OF SYNTHETIC RUBBER PLANT IN YAROSLAVL – AVANT-GARDE TYPE OF SOVIET URBAN DEVELOPMENT

N.S. Saprykina

Nataliya S. Saprykina

Department of Urban Development, Academy MUBiNT, Sovetskaya st., 80, Yaroslavl, 150999, Russia

E-mail: saprykinans@edu.mubint.ru



In 1932–1934, a new synthetic rubber plant and a new housing estate for its workers and staff had been constructing in Yaroslavl (Russia, Yaroslavl Oblast). Such a housing residence was called “sotposelok”, that literally means “social settlement”. Building on the example of this particular “social settlement” and taking into account the main principles of USSR urban planning, the paper establishes the idiosyncrasies of urban planning in the 1920s. The paper argues that a “social settlement” of Yaroslavl is a characteristic of the typological sample of the Soviet era illustrating the doctrine of the Soviet working village and provides new historic facts about urban planning of the city.

Key words: urban planning, architecture, Yaroslavl, constructivism, project, type, Soviet, socialist, working settlement, quarter, sample

For citation:

Saprykina N.S. Settlement of Synthetic Rubber Plant in Yaroslavl – avant-garde type of Soviet urban development. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No 3. P. 77-86 URL: http://comin-con.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_77



The last decade has seen sites of architectural and urban heritage disappearing from city maps. Arguing for the "real facts" of history is strongly opposed by potential investors in "redevelopment areas" and "renovation projects", since the restoration and renovation of historic buildings requires significant cost with minimal (or even no) benefit, while new construction in the central part of the city is quite profitable. This problem is especially troubling for the Soviet architectural and urban planning legacy of the 1920s–1960s, as buildings and structures were often made of low-quality materials, the layout and architecture were (especially during constructivism) rather ascetic and economic, and therefore unattractive to a modern potential owner, often not the brightest person but with above-average demands. The more so since the "age" of a historical object is comparatively short, and its value is usually measured in our consciousness by the limitation period; that is why the fate of the Soviet heritage is so unenviable today.

It seems that such a fate awaits the Soviet workers settlement ("**sotsposelok**") of the Synthetic Rubber Plant. It was built in Yaroslavl, Russia in the first half of the 1930s and reflects the basic principles and objectives of urban development in the studied period (Fig. 1). In the evolutionary development of urban planning concepts of the Soviet era, this residential format became an intermediate stage between the theory of "garden settlements" of housing cooperatives (HCCP), influenced largely by Howard's garden cities (garden-city Diadkovo as an example in Yaroslavl), and social cities (e.g., Yaroslavl Rubber and Asbestos Plant (YarRAK) social city), which became the basis in the development of the USSR [1].



Fig. 1. Part of the communal space of the SK-1 plant townsite, 1932-1934

This residential format – a Soviet townsite – was first and foremost in line with the official urban planning policy of the time, which shifted priorities towards the governmental-industrial form of building settlements for industrial enterprises.

Construction of the world's first synthetic rubber plant (SK-1) started in June 1931. As the host city for the plant, Yaroslavl was chosen for several reasons:

- firstly, the proximity of the city to the scientific and technological centers and industrial centers of the country, including Moscow and Leningrad;
- secondly, a large rubber-asbestos plant had started the construction in the city, and it was the main consumer of SK-

1 products (thus, the plants were being constructed next to each other);

- thirdly, a significant number of raw resources (potatoes) for the alcohol production were produced in the Ivanovo region (which Yaroslavl was a part of in 1928–1936), which, in turn, is the main raw material used in the synthetic rubber manufacturing;

- fourthly, the transport network is quite convenient and robust: there are railways, highways, and waterways for transportation of products to different regions;

- fifthly, the number of human resources: in 1931, the population of Yaroslavl was 155.5 thousand people [2, p. 16].

High construction pace (the goal was to put the plant into operation as early as June 1932), lack of qualified staff and poor construction management, difficult working conditions (lack of labor mechanization), and poor living conditions especially led to a constant turnover of staff. At first, the workers were accommodated in uncomfortable, hastily erected barracks, some of which were located in the Pochinki village behind the Krasny Perekop industrial complex, others were put near the Vspolye station. Unsanitary conditions, overcrowding, remoteness from the construction site – all these problems had to be urgently resolved to retain staff and to increase productivity. On July, 25th, 1931, the bureau of the Yaroslavl City Committee of the All-Union Communist Party made a decision on housing construction for builders and workers of SK-1 which had to be conducted at the same time as the construction of the plantⁱ. But it wasn't all that easy to put into action. The heavy overwork of the specialists of Yaroslavl construction office, lack of materials and manpower did not allow to tackle the problem at once. Only in 1932, the designers and builders could begin the construction of the complex housing, starting with the first stage of SK Social Settlement within the quarters No. 70-71, then the second stage within the quarters No. 61-69ⁱⁱ.

It was a vivid example of the implementation of Soviet urban policy in the 1920-1930's, when the industrial object began to act exclusively as a "city-forming" impulse for the area development and the key factor for the decision to expand the settlements or build a new workers village, often on an empty place.

In many early projects of Soviet worker settlements, the industrial facility was usually located in the center of the settlement, which, however, was not a strict legal rule for real design practice, since the distance of the industrial facility from the residential buildings was not specified numerically. Only a qualitative requirement was specified – the gap must "shield the residences from harmful effects". Therefore, the architects proposed layout options each time according to their own ideas.

When the production was too harmful and had to be put considerably far from the settlement (e.g., SK townsite), the "substitute object" began to play the dominant compositional role instead of industrial enterprise – a public building (community hall, club, party body building, guest house, or even a



bath, laundry, etc.). Another option was building a plant management office, which was the Yaroslavl tobacco factory at first (it hosted the SK management) and a club-canteen later.

September 27, 1926. The All-Russian Central Executive Committee and SNK RSFSR officially adopted the decree "On Worker Settlements", which established certain parameters and requirements for their organizationⁱⁱⁱ [3].

In 1927, the architect G.Ya. Wolfensohn published a book "Planning Working Dwellings. Workhouse and Townsite Planning Guide". In this book, he collected and described in sufficient detail the basics for the organization and arrangement of townsites [4].

Let us consider the specifics of organization of a Soviet worker settlement – a residential complex ("sotsposeelok") of the SK factory built in the first half of the 1930s (1932–1934) in Yaroslavl through the prism of the basic principles and attitudes declared by the state urban policy of the second half of the 1920s. It helped form and implement the doctrine of the Soviet worker settlement, which was reflected in the well-known work of G.Ya. Wolfensohn to appreciate the significance of the example and its typological essence^{iv}.

DISTINCTIVE FEATURES OF THE SOVIET TOWNSITES, SPECIFIC HISTORIC URBAN FORMATION

1) According to the Workhouse and Townsite Planning Guide, all types of townsites were boiled down to three main designations: a) a settlement of "urban" or "semi-urban" type "with all the elements of urban amenities with more extensive, but sufficiently cost-effective in terms of urban land development" of 2–4 storey "open" type (usually located in the areas and neighborhoods of large cities); b) "semi-rural" settlement with predominantly built-up small apartment complexes with simplified sanitary equipment (appeared at some large factory-factory enterprises near industrial centres, considered as a temporary settlement when transitioning); c) a rural-type settlement with extensive development of small apartment buildings made of local materials and following local construction techniques, usually without centralized engineering networks.

Obviously, the SK settlement belongs to the first type of worker settlement – "urban". The area was located within the city line in the late 1920s, closer to its northwestern boundary, on the street directly leading to the factory site. Development of residential buildings along ul. Grazhdanskaya – 3-storey, ul. Nekrasova corner – 4-storey, club-canteen – 4-storey, kindergarten – 2-storey. All centralized engineering networks were assumed to be installed.

2) "Cheapening the cost of workers' housing should be achieved by reducing the cost of both construction itself and the cheapening of operating costs" – this was the basic idea in the design of worker settlements and dwellings [4, p. 4]. Therefore, all the Soviet worker settlements of the turn of 1920–1930s were formed on regular planning, focused on the

maximum saving of funds and material resources. This type of layout (as opposed to "free", picturesque structure of "garden-cities") allowed to reduce the total length of driveways, the number of driveways with one-directional construction and the length of engineering networks (water, sewage, heat pipelines). This and the priorities of maximum standardization of housing for mass construction led to a reduction in the cost of landscaping and engineering equipment in the area and generally reduced the cost of construction of the settlement, as it was the "economy" that laid the basis for the projects^v.

It follows from the above-mentioned installations that the "SK plant townsite" is a typical example of such a planning solution. The archive drawings for the heating of the SK-1 plant settlement (1935) and the master plan for the project of building a 40-apartment house for the SK-1 plant at ul. Lubimskaya (now ul. Tchajkovskiy), covering the entire area of the neighborhood, including the first phase of the SK-1 plant settlement, can clearly read all the basic solutions adopted in accordance with the requirements for the planning of a worker settlement of the turn of 1920s-1930s (Fig. 2).



Fig. 2. Archival drawing from the heating project of SK-1 plants settlement (first and second stages of construction), 1935

Main positions formulated by G.Ya. Wolfensohn in his work [4, p. 118] lead to the following ideas:

1. Uniform development of the entire perimeter of the block. At the same time, a string of recurring residential buildings along ul. Grazhdanskaya allowed minimizing the length and volume of all networks, roads, and other elements of improvement, as well as to achieve a sufficiently high residential density.
2. Preservation of the quadrangular outline of the block.
3. Maximize the use of frontage at street intersections, which is accomplished by cutting land at block corners or reducing the size of corner lots. In the development project of the SK-1 plant settlement, this requirement is met by shifting buildings from the corner of the intersection and creating the green square on the corner.
4. Reducing gaps between houses.



5. Intersect streets and driveways at right angles whenever possible.

6. Topography of the settlement area is quite important in terms of upstream and runoff water drainage in relation to the overall choice of direction of streets and driveways.

3) Unlike the garden-city, the Soviet worker settlement eliminated private businesses and introduced state (public) service, which required a preliminary calculation of both the optimal composition of the living conditions and the minimum services offered, which continued later, when designing social cities (settlements ten times larger than the Soviet worker settlements).

As a mandatory component, the projects of worker settlements had to include collective service facilities [5]. In the mid-1920s, this system already had several spatial and territorial levels:

1. institutions to serve the needs within a small group of the primary group (within a residential building), e.g., replacing common rooms in apartments (living rooms) with common rooms for all tenants (common laundry rooms, workshops, spaces for reading, socializing, political, and cultural propaganda, etc.) or replacing individual kitchens with communal cooking facilities;
2. Facilities to serve several groups with attached community services, such as kitchen-canteens;
3. institutions for the needs of the whole settlement in separate buildings: library with a reading space, public meeting hall (community hall), kindergarten, school, bathhouse and laundromat, etc. [6, p. 92-93].

The structure of the settlement of 1500–2000 inhabitants had to provide for a certain list of public buildings of collective use^{vi}.

All levels of community service facilities from those listed above exist in the "SK worker settlement" with a small adjustment, which is putting the second and third levels of service together in the separately located social and cultural spaces, in particular, the club-canteen. The choice of a site for the worker settlement, despite of approximately 1000 people (about 400 people could be accommodated in the constructed houses of the first phase, which occupy half of the block), assumed good accessibility to the necessary elements of a social and cultural life that exist in other blocks: YARAK public bath and laundromat; the school on ul. Mologskaya (Pobedi); the city hospital on ul. Zagorodny Sad; the administration of the plant and settlement, located on the territory of the former Dunayev's tobacco factory diagonally from the intersection of Grazhdanskaya and Mologskaya streets (October prospekt and ul. Pobedi); shops^{vii}.

4) Compared to the garden-city, in Soviet worker settlements, the functions of residential areas expanded due to the inclusion of public service facilities, as well as the creation of common recreational, sports, children's playgrounds, and

intra-block public spaces within blocks of houses, mostly for economic and recreational purposes. The layout of the Soviet worker settlement also called for the creation of a special zone in which "institutions for the needs of the entire settlement" were located in green areas: school, children's institutions, hospital, settlement-wide sports facility. A network of small sports facilities (sports grounds at houses, schools, and clubs) was also formed in the social settlements, and the regulations provided for a green area for occasional recreation of the settlement inhabitants on the edge of the settlement.

All these "arrangement specifics" were envisaged in the structure of the "SK-1 social settlement". The central part of the area deep into the block was allotted for a kindergarten, surrounded by a lot of greenery with a central alley leading to the main entrance from ul. Grazhdanskaya. Located at the intersection of two compositional axes of the block, with equal accessibility from all built and designed residential buildings of the block, it became the main compositional node of a new type of residential formation and a place of concentration of different types of community spaces and areas for purchases and recreation (Fig. 3).

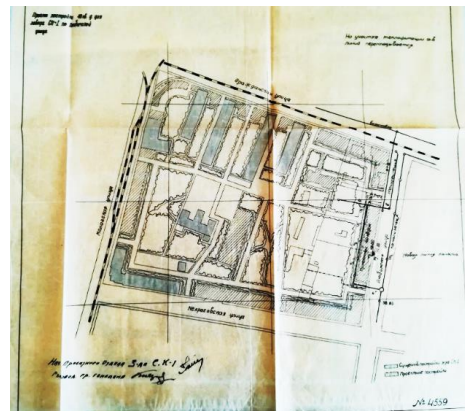


Fig. 3. Archive drawing of the general plan of the territory of the 1st stage of SK-1 social settlement, 1935.

I.I. Knyazev, Head of the General Plan Group

Judging by its present condition and the found archive drawings, many of the solutions for the settlement landscaping, the formation of street plantings corresponded to the requirements described in the Planning Working Dwellings. Workhouse and Townsite Planning Guide^{viii}.

And although G.Y. Wolfensohn pointed out that "the issue of arrangement of green spaces in the settlements often demonstrates completely opposite approaches and complete variability," however, compliance with the basic principles of gardening can be traced in the SK-1 worker village^{ix} [4, p. 96]:

- deep penetration of greenery from the borders of the settlement to its center;

- proximity of public landscaping areas (parks and squares) to residential areas and their convenient transportation (the central alley of the SK social settlement is connected directly to the square on the opposite side of ul. Grazhdanskaya (October prospekt, where the monument to Dimitrov was erected later) and further straight to the YARAK park in the Volga



River floodplain and in the opposite direction – to the park of the "Butusov's settlement");

- use of green areas for recreation and creation of sports and children's playgrounds within their boundaries.

5) The settlement area had to be formed by a special type of housing – communal, family-to-room settlements by groups of workers of the city-forming enterprise and service institutions. That was stipulated in the project of the SK-1 plant settlement.

And although according to all requirements and temporary building norms in the 1920's and 1930's, the small-family house was the "preferred type" of township housing, yet even then it was recognized that multi-storey apartment buildings were more appropriate for urban areas^x.

For the construction of the first stage of the settlement, a typical two-family section was chosen. It became the basis for the design of four three-storey residential buildings placed at the ends of the street. The building was constructed in the ul. Grazhdanskaya (two three-section and two four-section, 18- and 24-apartments, respectively). This choice was very typical then. It was an attempt to get closer to creating 'standardized urban housing designed for the mass working consumer'. In doing so, the condition of creating the most economical in all solutions and indicators buildings was met: from the used improvised materials – silicate or ceramic bricks (which were available including from demolition of famous constructions), insulation with fiberboard slabs, the simplest volume solution of buildings as parallelepipeds, no balconies, limited number of types of windows and doors – the main elements of facades to obtain the maximum number of living space apartments in room-by-room settlement (Fig. 4).



Fig. 4. Fragments of facades of 18- and 24-apartment buildings of the first stage of SK-1 plant settlement, the drawings were signed on April 10, 1932

Another residential building of a worker settlement – a four-storey building, on the corner of intersection of Mologskaya and Nekrasovskaya streets (Pobedy and Nekrasova). Its first phase was built along ul. Nekrasovskaya and featured the same characteristics as the three-storey houses, but its corner section and the sections along ul. Mologskaya (the second phase) are decorated with small "excesses" – balconies on the long facade on the side of ul. Mologskaya (from the second

to the fourth floor). It was apparently dictated by the orientation to one of the main city streets, as well as changes in time building requirements (Fig. 5).



Fig. 5. Residential 4-storey apartment building at ul. Mologskaya (Pobedy) (second stage of house construction) Thus, "SK social settlement" is a typical example of a standardized solution of the architecture of residential buildings, as evidenced by the layout of the sections and equal living conditions (quality of housing) of rank and file and management employees of the enterprise. One can see the same tendencies (in the same sequence) in the residential buildings of the worker settlement as elsewhere in the USSR, and it achieved the main goal at the time formulated by G.Ya. Wolfensohn^{xi}.

6) Soviet worker settlements were built when constructivism dominated the architecture of buildings and facilities, and their styles traditionally reflected the most typical techniques and principles of this avant-garde movement. These include:

- functional and constructive appropriateness, rationality of forms;
- geometric clarity and conciseness of volumes,
- long strips of glazing,
- contrast of blank surfaces with large areas of glazing,
- identifying the social specificity of the building in its appearance,
- the presence of imagery and monumentality, the preferred dynamism in many compositional solutions of buildings and structures, reflecting the spirit of the time, the new era and the constant progressive development of the country.

All these principles are reflected in the architecture of residential and public buildings of the SK-1 plant worker settlement. Residential buildings, for all their economic and geometric expediency, minimalism in the use of techniques and details, are nevertheless distinguished by a bright memorable appearance. It is the end location of the four residential buildings, supported by the asymmetrical arrangement of the balconies on them and the stepped parapet, which forms an active dynamic rhythm of development along ul. Grazhdanskaya (October prospekt), makes the architecture memorable and bright. The contrast of plaster horizontal stripes with the rhythm of the vertical stairwells and canopies of entrances, emphasized by minimally protruding risalits (created by the same fiberboard overlays and surface plaster) is the main theme of simple in its composition extended flat facades, which would not look so advantageous in the case of perimeter development of the block. The author of the project very



accurately chooses the layout of the building, on the one hand, playing with the strengths and weaknesses of the standard projects of houses, on the other hand, satisfying the regulatory requirements of that time for the artistic design of working-class housing, particularly cooperative housing^{xii} (Fig. 6).



Fig. 6. Computer model of the residential development of the working village of the SK-1 plant.
Computer graphics – S. Shawman

The brick building of the **club-canteen** also looks original [7]. Designed to serve a single company, it was a compact box (7,500 m³). The enlarged scale of the building as compared to the residential buildings singled it out from the environment as a composite urban accent of the worker settlement. The site at the intersection of ul. Mologskaya (ul. Pobedy) and ul. Grazhdanskaya (October prospekt), was chosen as the construction site, with a significant indentation from the latter, where a green square was laid out in the formed triangular area. The composition of the building is not actively angled due to the chosen position. At the same time, the facade of the building on the side of ul. Grazhdanskaya (lateral) has a



Fig. 7. Club-canteen of the SK plant social settlement, 29 ul. Pobedy, 1934. Side and main facades

The solution of the kindergarten is as much unique. It organically fit into the context of the worker settlement with its shape and volume. In 2019, it was promptly demolished without any approvals (Fig. 8).

Based on this analysis, we can safely say that the "SK social settlement" is a typical example of avant-garde stylistic direction, as evidenced by the architecture of all residential and public buildings. The stylistic properties and the organized environment create that necessary "psychological comfort" (already at that time such concept was thought of!), which resulted not only from utilitarian

pronounced dynamics and is the fifth (final) component of the frontal rhythm of the development along ul. Grazhdanskaya (together with the facing houses). From ul. Mologskaya (ul. Pobedy), key priority was the static symmetrical solution of the main extended facade, which logically fit into the block's layout with a large corner four-storey building, forming its "compositional counterbalance". The frontal composition of the main facade is geometrically simple, with a clear rhythm of windows, the "movement" of which stops at the edges and ends with the vertical blank sections of the wall, accented by two symmetrical entrances with rectangular canopies and a simple cornice. And although the volume of the building is not divided into parts, the internal content is clearly readable through its basic details – windows of different sizes of square and rectangular shapes. The largest windows on the first floor emphasize the location of the main clubroom, slightly smaller windows on the first floor – the canteen, the third largest windows on floors 3-4 are the cell-like club rooms, the smallest windows on the side facades – the rooms of economic and auxiliary purposes. Two symmetrical staircases, enclosed by blank wall sections on the main facade, are marked at the ends of the volume by a vertical row of windows, constituting the main compositional axis of the lateral facades. Strict rectangular outline of the building, underlined by a simple rhythm of windows, ascetic detailing, reflects the official nature of the institution and simultaneously the difficult economic conditions in which the plant was built and the social infrastructure for its workers. Absolute logic and naturalness of the organization of social processes, for which the building was intended, as well as the artistic image are the indisputable merits of this construction, a striking embodiment of the spirit of its time (Fig. 7).



residence conveniences, but also from the perception of environment, the general cultural level of people, their lifestyle, health, economic level, and professional specifics of the consumer.

A great influence on the development of a new type of urban housing (SK-1 plant worker settlement) and architecture of its residential and public buildings was coming from the competitions and numerous residential complexes built by that time, primarily in Moscow, Leningrad, Ivanovo, Sverdlovsk, and others, including Yaroslavl, as well as professional skill and experience of the project author I.I. Knyazev^{xiii}.



Conclusion. Summarizing the conducted analysis of the organization specifics of the Soviet worker settlement such as "SK social settlement" in Yaroslavl, we can safely say that it *fully complies with all the principles of socialist urban planning of the second half of the 1920s – first half of the 1930s and is a typical example of such urban development.*

Today, the SK plant settlement still exists, despite the dismal appearance of its buildings and the state of improvement, and the demolition of the kindergarten. It can and should still be restored and preserved. It is necessary to thoroughly restore the village, returning everything that was lost during

irresponsible exploitation and various reconstructions, to find a new functional filling of the ensemble. It will make it not only profitable and viable, but also attractive for a new theme for tourism in the city – the theme of Soviet urban planning and architecture. After all, this is a detailed version of the urban planning concept as it was interpreted and presented by supporters of the Soviet avant-garde and the Soviet authorities in the 1920s and 1930s. Our professional duty is to preserve for posterity **a unique type of such urban formation in Yaroslavl**, in which the dream of a society of social justice is reflected.

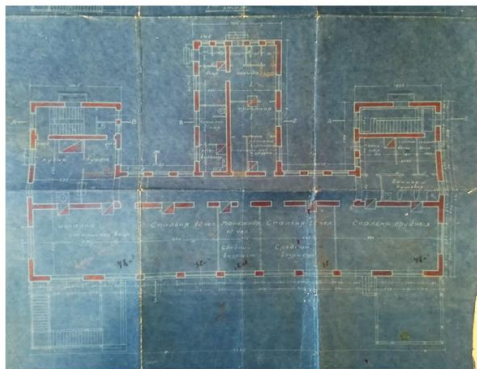


Fig. 8. Archival drawings of the plan and facade of the kindergarten building showing the date of approval of the project on July 4, 1932

ЛИТЕРАТУРА

1. Советское градостроительство. 1917-1941. Книга вторая. М.: Прогресс-Традиция. 2018. 672 с.
2. **Митькова Т.Н.** Первенец СК. Из истории Ярославского завода синтетического каучука. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во. 1965. 118 с.
3. Декрет ВЦИК и СНК РСФСР «О рабочих поселках» от 27 сентября 1926 года: Библиотека нормативно-правовых актов Союза Советских Социалистических Республик. URL: http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3064.htm
4. **Вольфензон Г.** Планировка рабочих жилищ. Руководство по планировке рабочего дома и поселка. М.: Город и Деревня. 1927. 143 с.
5. **Кожаный П.** Жилищная кооперация и новый быт. Рабочая жилищно-строительная кооперация. 1925. № 4. С. 46-47.
6. **Меерович М.Г.** От городов-садов к соцгородам: основные архитектурно-градостроительные концепции в СССР (1917 – первая половина 1930-х гг.); автореф. дис. ... д-ра арх. М. 2015. 47 с.
7. **Сапрыкина Н.С.** Советская архитектура Ярославля. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006. 496 с.

Поступила в редакцию 20.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

1. Soviet Urban Planning. 1917-1941. Book Two. M.: Progress-Tradition. 2018. 672 p. (in Russian).
2. **Mitkova T.N.** The firstborn of SK. From the history of the Yaroslavl Synthetic Rubber Plant. Yaroslavl: Verkhne-Volzhskoe knizhnoe izd-vo. 1965. 120 p. (in Russian).
3. Decree of the All-Russian Central Executive Committee and the Council of People's Commissars of the RSFSR "On Workers' Villages" of September 27, 1926. *Biblioteka normativno-pravovykh aktov Soyuzha Sovetskikh Socialisticheskikh Respublik.* URL: http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3064.htm (in Russian).
4. **Wolfensohn G.** The Planning of Workers' Homes. Handbook on the Planning of Workhouse and Settlement. Moscow: Town and Country. 1927. 143 p. (in Russian).
5. **Kozhaniy P.** Housing co-operation and new life. *Workers' housing and building co-operation.* 1925. N 4. P. 46-47 (in Russian).
6. **Meerovich M.G.** From Garden Cities to Social Cities: Major Architectural and Urbanistic Concepts in the USSR (1917 – first half of the 1930s). Author's abstract of PhD Thesis. M. 2015. 47 p. (in Russian).
7. **Saprykina N.S.** Soviet architecture of Yaroslavl. Yaroslavl: Izd-vo YaGTU. 2006. 496 p. (in Russian).

Received 20.09.2021

Accepted 20.09.2021



Notes:

ⁱ Every year more and more funds were allocated for improving the living conditions of the SK-1 workers. For example, in 1935, up to 70% of the funds received from the excessive production cost reduction were used for residential construction. By 1937, the townsite had expanded with a complex of residential buildings with a total area of 7260 square meters, a kindergarten, a club house, and even a one-day rest house for 80 persons in Norskoe; apartment buildings for the plant's specialists in different central streets of the town had also been laid [2, p. 62].

ⁱⁱ The choice of the site for the construction of the settlement was not accidental. The construction management of the SK-1 plant was located on the territory of the tobacco factory (mothballed at that time) since May, 1931. Therefore, the nearby territory (diagonally from and opposite the factory) was the best option for that period – always under control, convenient location within the city, close to the YarRAK social town with the already functioning infrastructure (bathhouse, laundry, sound cinema within the social town and many other facilities). In the immediate vicinity there also was a technical school at the SK-1 plant.

ⁱⁱⁱ Thus, the first paragraph of the decree of the All-Russian Central Executive Committee and SNK RSFSR stated that "settlements ... may be recognized as worker settlements, provided that the number of adults in them is not less than four hundred people, and for the majority of the population (not less than sixty-five percent), the main source of subsistence is wages".

^{iv} Georgii Yakovlevich Wolfensohn (1893-1948), architect (civil engineer). Graduated from PIGI in 1918.

^v At the same time, according to the "...Guide" by G.Ya. Wolfensohn, "the principles of economy, carried out in the planning of a particular settlement, must be linked to the individual character of the settlement..." [4, p. 118].

^{vi} According to the "...Guide" by G.Ya. Wolfensohn, a normal townsite designed for 1500-2000 people, shall provide for the following facilities: cooperative shop; the township administration building (near the main street or square); post office, public canteen ("under it, usually a club with reading room"), which "are located in the central and sufficiently advantageous architecturally settlement space; a fire station near the administration; kindergarten and nursery school (designed "according to the number of children, based on 3-4% of the total population of the village"), first grade school (on a fairly large plot); an outpatient clinic with a pharmacy and a laundry [4, p. 97-98].

^{vii} According to the provisional building rules and regulations for the construction of houses in townsites dated July 28, 1926 (para. 16), when determining the size of an apartment

according to the number of future occupants, 9-10 m² of living space per person shall be assumed; when determining the area of rooms intended only for sleeping (bedrooms) and being part of an apartment that meets the above norms, 6-7 m² of floor space and 20 m³ per person shall be assumed.

^{viii} "Street plantings constitute one of the essential elements of a working village, communicating to it, besides its coziness and attractiveness..., coolness and fresh air. In addition, they serve as protection of residential buildings from street dust.

For this purpose, the pedestrian part of the sidewalks is arranged in the form of an alley planted with trees on one or both sides. For double-sided planting, it is advisable to stagger the trees; this results in a more uniform shade, and the alley itself benefits aesthetically.

The most suitable tree species for street planting in the middle and northern part of the USSR are linden, poplar, maple, birch, willow...

... boulevards, squares and parks ... should constitute a system of continuous network of greenery...." [4, p. 95].

^{ix} Construction project of a 40-apartment building for SK-1 in ul. Lyubimskaya (ul. Tchaikovsky) (tentatively 1935) and the project of "Heating of the residential construction of SK-1" dated 12.06.1935 (from archival materials of SK-1).

^x "Development of valuable urban land requires intensive use in terms of both the number of stories of structures erected and the density of development. Due to this, the settlement requires sufficiently profitable residential buildings in comfortable urban areas and to take into account the costs of communal amenities besides the construction costs. In this respect, low-family and low-rise houses, despite all their economic and sanitary-hygienic advantages, in conditions of urban and large suburban construction, should often give way to high-rise buildings..." [4, p. 43].

^{xi} "The standardization of whole houses or parts of houses (sections) may be considered appropriate in the context of township construction or simultaneous development of large urban complexes. Repetition of a few standard types is the surest way to improve and cheapen them..." [4, p. 11].

^{xii} "No ornamentation such as moulding, elaborate cornices, etc., should be allowed in facades; it is necessary to strive to the external beauty and coziness by applying successful proportions and using elements of the house, which can have at the same time a utilitarian purpose, such as windows, doors, balconies, bay windows, parapets, etc." [4, p. 14].

^{xiii} It was established that the author of the complex was the architect I.I. Knyazev, a fairly well-known creative figure of the 1920s era in Yaroslavl. He designed such famous structures in the city as the Gigant cinema (club) (1931-1934), the Soviet Bank building in ul. Komsomolskaya (1928-1929, together with G.P. Goltz), and other buildings.



УДК 72.038

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИЙ КОНСТРУКТИВИЗМА НА ПРИМЕРЕ ЖИЗНИ ИВАНОВО-ВОЗНЕСЕНСКА 1920–1930-х ГОДОВ

Н.А. Личак

Наталья Алексеевна Личак

Кафедра гуманитарных наук, Ярославский государственный технический университет, Московский пр., 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023

E-mail: lichakna@ystu.ru



Изучены особенности создания новых типов общественных зданий в 1920–1930-х годах постреволюционной России в Иваново-Вознесенске, получившем административный статус центра новой жизни. Этот статус предполагал создание соответствующей инфраструктуры и включение городской территории в план реализации передовых архитектурных и инженерных идей мирового уровня. Планы социалистического строительства предусматривали комплексное архитектурное оформление города, отображающее «идеологию пролетариата» и являющееся «мощным орудием классовой борьбы». Данные мероприятия были вызваны активным развитием текстильного производства и ростом городского населения, переустройством народного быта. Проекты ведущих архитекторов страны и местных специалистов, ориентированные на создание функционально-конструктивной основы зданий, легли в основу манифеста конструктивизма на родине Первого Совета революционной России – в городе Иваново-Вознесенске. В статье рассматриваются проекты архитектурной пропаганды – фабричные и жилищные территории, которые замышлялись как идеологические центры городского пространства.

Ключевые слова: конструктивизм, архитектурные проекты Иваново-Вознесенска, идеология, дом-пуля, дом-подкова, дом-корабль, прядильный корпус фабрики «Красная Талка», фабрика им. Ф.Э. Дзержинского

Для цитирования:

Личак Н.А. Реализация концепций конструктивизма на примере жизни Иваново-Вознесенска 1920-1930-х годов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 88-96 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_88



UDC 72.038

THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTIVISM CONCEPTS IN IVANOVO-VOZNESENSK IN THE 1920s–1930s

N.A. Lichak

Nataliya A. Lichak

Department of Humanities, Yaroslavl State Technical University, Moskovsky ave., 88, Yaroslavl, 150023, Russia

E-mail: lichakna@ystu.ru



We study the specific features of new public building construction types in post-revolutionary Russia in Ivanovo-Voznesensk in 1920–1930s. That time the city acquired the administrative status of the centre of new life. This status meant the development of appropriate infrastructure and the integration of the urban area into a plan to realise world-class architectural and engineering ideas. The plans of the socialist construction provided for a complex architectural design of the city, which represents «the ideology of the proletariat» and «powerful tool of class struggle». The active development of textile production and the growth of the urban population along with the transformation of the national way of life caused this change. The projects of the country's leading and local architects, focusing on the functional and structural basis of buildings, laid the foundations of the constructivist manifesto in Ivanovo-Voznesensk, the birthplace of the First Council of Revolutionary Russia. This article considers architectural propaganda projects - factory and housing estates that were designed as ideological centres of urban space.

Key words: constructivism, architectural projects of Ivanovo-Voznesensk, ideology, “House-bullet”, “Horseshoe”-house, “House-ship”, the Spinning building of the factory “Krasnaya Talka”, the building of F.E. Dzerzhinsky factory

For citation:

Lichak N.A. The implementation of constructivism concepts in Ivanovo-Voznesensk in the 1920s-1930s. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 88-96 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_88



INTRODUCTION

The methodological basis of the constructivist concept

The work of architects professionally involved into the creation of city planning structure forms the any city image. The process of forming new mechanisms of agitation and propaganda influenced to the specific arrangement of Russian cities urban space. In the 1920s and 1930s, the idea of urban modernisation and reconstruction in terms of ideological objectives became widespread. The characteristic feature of that period architecture was the tendency towards enormous building sizes and arranged spaces.

In order to understand the implementation of constructivism concept in 1920s and 1930s revolutionary Russia, it is necessary to analyse the conditions for the implementation of urban planning ideas. The theory and practice of architecture requirements of that time expressed the political and economic changes in the country. In addition, urban policies were an effective means of influencing the attitudes of both the individual and social groups. The scale of the architectural development was an achievement not only for the capital cities, but also for the provincial towns.

Constructivism became one of the leading trends not only in Russia, but also in Western Europe among architects and artists who actively promoted scientific and technological progress. Design and functionality are the main features of constructivism. There were debates among the constructivists on the meaning of 'construction'. Combinations of different height cubic volumes, sharp angles, semi-circles, decorations - all these functional details pointed the external composition.

The rapid development of construction industry, creative competitions and the participation of leading European architects in post-revolutionary construction Russia's projects provided the opportunity to implement a wide variety of international architectural ideas for a short time. Constructivism as an art trend was associated with the names of Tatlin, Rodchenko, Hahn and Stepanova, while in architecture it was associated with Karl Melnikov, the Vesnin brothers, Ginzburg, Nikolsky and Golosov. In a short period of time the leaders of constructivism implemented projects for the Soviet citizens' everyday life developed new types of public buildings - Palaces of Labour, Council Houses, workers' clubs and commune houses [1]. The main idea of constructivism was: "Art had to serve industry, and industry was to serve the people" [2]. The garden city was built in the Sokol settlement in Moscow, an October garden settlement in Vologda, and Red Garden City project was developed in Rostov-on-Don. More than 50 buildings in the constructivist style were constructed in Ivanovo-Voznesensk.

When talking about the early period of constructivism, researchers points two characteristics features. Firstly, it is originality in artistic matters of form: that time Western architecture and its newest trends had practically no influence on the constructivist architects, they developed by their own

way without contact with their Western colleagues. Secondly, the desire to find architectural expressiveness. The Constructivists did not replace architectural decoration with painting or sculpture. They experimented and searched for new possibilities of architecture. Constructivist components can be seen in Western high-tech projects in Paris, New York and Chicago.

But in the 1930s, constructivism was declared an irrelevant phenomenon in the USSR. Architects and engineers began to be persecuted and the 'Stalinist Empire' came to the forefront of architecture. At the same time, in Europe, constructivism was extended with new forms and proved for many years to be the most popular international style [3-5].

Discussion of constructivism as an artistic and architectural philosophy of Ivanovo-Voznesensk in the 1920s and 1930s

Ivanovo-Voznesensk (since 1932 - Ivanovo) became a unique example of the transformation of the architectural environment under the influence of constructivist ideas. Ivanovo, the actively developing textile capital of the USSR claimed the role of the "third proletarian capital" (after Moscow and Leningrad) [6]. It had the special status. By the Resolution of the Presidium of the Central Executive Committee of 14 January 1929, the districts of Aleksandrovsk, Vladimir, Kineshma, Kostroma, Rybinsk, Shuisky, Yaroslavl and Ivanovo-Voznesensk became part of the Ivanovo Industrial Region (IOR) [7].

In the capital of the industrial region, architects began to implement the idea of a socialist 'garden city' by introducing industrial and residential buildings, institutes, public infrastructure facilities, etc. However, the old buildings were not kept. Thus, at the turn of the 1920s and 1930s, the main church complex of the city, consisting of the churches of the Exaltation of the Cross (1795) and the Nativity of Christ (1858, arch. N. K. Reim), was destroyed and replaced by the Revolution Square. The building of the Drama Theatre is located on the place of destroyed Virgin Protection Cathedral (1693) and the Church of the Holy Trinity (1817). The Cathedral of the All-Merciful Saviour (1898-1903, arch. F.O. Shekhtel) and the New Kazan Chapel (1915-1917, arch. I.E. Bondarenko) were replaced by the building of the central post office. The center of Ascension Township was left without Ascension Church (1851) [8]. The rapid development of the weaving industry in Ivanovo required the foundation of new factories In 1927 the architects B.V. Gladkov and I.S. Nikolaev realised their constructivist project - the Spinning building of the factory "Krasnaya Talka" (Fig. 1).

The Dzerzhinsky F.E. factory was also an example of early industrial architecture in constructivism (Fig. 2). There was an all-union design competition in 1926. The work of the local design bureau of the Ivanovo Textile Trust and its authors, the architect A.A. Staborowsky and the engineer N.V. Rudnitsky won the 1st prize. There were evident new expressive means in the appearance of the factory. The young engineers, graduates of the Ivanovo-Voznesensk Frunze Polytechnic Institute



designed the individual elements of the factory building. The factory was the first large textile enterprise built by the Soviet authorities in the Ivanovo region.



Fig. 1. The Spinning building of the factory "Krasnaya Talka" [9]



Fig. 2. The factory named after F.E. Dzerzhinsky [10]



Fig. 3. "House-ship", Lenin ave.

The country's leadership, having industrialised the country, provided the necessary conditions for systematic work and the restructuring of everyday life by socialist principles. The Resolution of the Central Committee of the All-Union Communist Party of Bolsheviks "On the Restructuring of Living Conditions" of 16 May 1930 legally enshrined the workers' active position in improving their living conditions. For

example, a compact settlement at a large industrial enterprise with a population of no more than 100,000 people had to have living houses and infrastructure [13].



Fig. 4. "Horseshoe"- house, Gromoboya st.

The new designs of "metaphor houses" – the "House-ship" (1929-1930, arch. D.F. Fridman; Fig. 3) and the "Horseshoe" house (1933-1934, arch. A.I. Panov; Fig. 4), as well as the "House-bullet" (1930-1932, arch. N.I. Kadnikov; Fig. 5) and the "four-hundredth" (400-apartment) "Collective House" in the First Workers' Settlement (1929-1931, arch. I.A. Golosov) [13] **were the brilliant examples of constructivism.** The designs of the new buildings have rational and utilitarian features. The lower floors were adapted for a nursery, kindergarten, canteen, laundry, meeting rooms, etc. The flats free of kitchens and baths were at the upper floors. The social institutions close to the work and living space were supposed to help to woman in the domestic work. According to informal sources, the "House-bullet" is connected with the "Horseshoe" house by an underground tunnel.



Fig. 5. "House-bullet", Red Army st. [13]

Designers believed the factory kitchens will become the places serving as a canteens, libraries and clubs. The building of the Narpit No. 2 canteen factory. (arch. A.A. Zhuravlev; 1930–1933) was an example of constructivism. The g-shaped building with a rounded outer corner has three floors full of large halls. The main entrance was on a corner, in a deep niche, under an overhanging second-floor corner supported by concrete pillars [6]. Huge, wide, almost ribbon-like horizontal windows flanked the main entrance. They are flanked by towers (in which the stairwells are located) that loomed



over the entire volume. This architectural composition has become characteristic for this type of building.

These large-scale works had ultra-modern appearance. Their logic of construction and external simplicity seems to be a single mechanism of the creative group and the similar architects' views. "Red-brick constructivism", with its unusual layout of projects and original planning of living space stayed in Ivanovo-Voznesensk for a long time.

The logical, rational, simple art of constructivism did not always realise the real needs of people. These ambitious urban ideas collapsed as rapid industrialisation became increasingly exposed to the problem of resource deficit. Not all plans were reasonable and appropriate. By opinion of the architect M.J. Ginzburg, "...a complete work of architecture, like any truly modern thing, is not a house, not a thing plus some aesthetic addition to it, but a reasonably and planned concrete task, containing the maximum of its expressiveness in the method of its organisation" [16].



Fig. 6. The Circus building [14]

Thus, the building of the first Soviet state circus, constructed in the early 1930s. (arch. S.A. Minofyev [17], engineer B.V. Lopatin, Fig. 6), became the most striking architectural object not only of Ivanovo-Voznesensk, but also of Soviet Russia. The architects created a unique engineering dome structure made of wooden lattice trusses with half arches. The arena could be used not only for circus, but also for theatre, music, film performances and other public events.

The culmination of the ideas of constructivism was the construction of the Railway station (arch. V.M. Kaverinsky, 1933), building of Iveselbank (arch. V.A. Vesnin, 1928), hotel "Centralnaya" (dormitory of Ivanovo City Council, arch. D.V. Razov, 1930), buildings of Ivanovo-Voznesensk Polytechnic Institute (arch. I.A. Fomin, 1928–1937) [6]. The contrast of two buildings of equal height but different lengths, united by the angular, semi-circular volume of the staircase is the base of the building structural composition. The clear planes of continuous glazing on three floors contrastingly complement their monolithic façades. This composition of the façade gives

the effect of elevating the volume of the building above the ground and visually lightens the construction [6].

Constructivism had a widespread in Soviet architecture in the mid and second half of the 1920s. The twentieth century, corresponded to the new, revolutionary spirit of the time and became in fact a great, dominant style, replacing the eclecticism and art nouveau of the preceding decades. It should be noted that not all plans were implemented in the practice of urban architecture of Ivanovo-Voznesensk. For example, residential houses for Gostekstiltrest's employees (arch. I.I. Leonidov); the People's House with a theatre (1200 seats), Lenin Museum, library and gymnasium designed by the Moscow architects Boris and Mikhail Barkhin; two buildings of the House of Soviets on Revolution Square (arch. V.M. Galperin; 1935) were not built. The non-realisation of the projects concerns with the change of political situation of mid-1930s. And, of course, it led to a complete change of Ivanovo-Voznesensk architectural policy.

CONCLUSIONS

In the 1920s and 1930s, the urban planning policy of Ivanovo-Voznesensk took a contradictory route marked by both achievements and mistakes, with significant consequences for the local architectural practice. The idea of constructivism was one of the factors in the realisation of basic socialist ideas and the forming of public opinion. The face of the city has changed radically within a decade. In particular, new factories, schools, cultural institutions and housing complexes were built.

By experts, constructivism in Ivanovo-Voznesensk is an experience of combining utopian architectural images with reality. At the same time, the designers found the unusual compositional and stylistic concepts during the industrial and residential development of the city. The use of constructivist ideas focused people's attention on the revolutionary past, a call to action. Ivanovo-Voznesensk (Ivanovo) transformed into the third proletarian capital of the revolutionary republic. Urban blocks were the complete architectural ensemble, encouraging people to redevelopment of the entire city's architecture.

Leading architects of Moscow and Leningrad – the Vesnin brothers – Alexander Alexandrovich, Viktor Alexandrovich, Leonid Alexandrovich, A.V. Vlasov, I.A. Golosov, I.A. Fomin, as well as representatives of the local architectural school – V.I. Pankov, S.A. Minofyev, N.I. Kadnikov – developed and implemented their projects in a short time. But not all plans have been realised. The limited abilities of local design organisations, regular architectural workshops management changes and the lack of experience influenced negative on the further history of constructivism in Ivanovo.

Nowadays the most buildings are in a strong decline. Many of the buildings have rather historical than architectural value. Touristic guides offer the new sightseeing routes: "Ivanovo – Soviet and Industrial", "Ivanovo: Myths and Reality".



ЛИТЕРАТУРА

1. **Петрова Е.С.** Советский конструктивизм. *Журнал института наследия*. 2019. № 4 (19). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovetskiy-konstruktivizm>
2. **Старков И.** Текстильные эксперименты Поповой и Степановой. *Arzamas.academy*. URL: <https://arzamas.academy/materials/43>
3. **Lizon P.** Palace of the Soviets: Change of Direction in Soviet Architecture, 1920-1940. *Passeggiata Pr.* 1989. 244 p.
4. **Oswald A., Meuser Ph., Krikaljow S.** Architektur für die russische Raumfahrt vom Konstruktivismus zur Kosmonautik: Pläne, Projekte und Bauten. Berlin: DOM Publ. 2013. 411 p.
5. **Gabo N.** Constructions for real life. Tate Publishing, 2020. 155 p.
6. **Седова Л.А., Куприна А.М.** Памятники конструктивизма в Иваново: конструктивизм в действии. *Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум-2016»*. URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016025586>
7. Районы Ивановской промышленной области. Ч. 1. Экономическая характеристика. М.-Иваново. 1933. 296 с.
8. **Личак Н.А.** Разрушение памятников церковного зодчества в Иваново-Вознесенской губернии в 1920-1930-х годах. *Известия ТулГУ. Гуманитарные науки*. 2010. № 2. С. 83-91.
9. Прядильная фабрика «Красная Талка». URL: <https://kartarf.ru/images/heritage/1080/2/25641.jpg>
10. Фабрика им. Ф.Э. Дзержинского. URL: https://culture37.ru/wp-content/uploads/2017/07/DSC_0246-1-1024x685.jpg
11. **Тимофеев М.Ю.** Потаённый конструктивизм Иваново-Вознесенска. *Русское искусство*. 2016. № 1(49). С. 16-23. URL: http://www.rusiskusstvo.ru/content/files/2016_1/Full/16-23_Timofeev%20f.pdf
12. Иваново. Достопримечательности. Дом-корабль. URL: <https://avia-mir.ru/Dostoprimechatelности/dom%20korabl.jpg>
13. Здание Ивсельбанка. URL: <http://theconstructivistproject.com/upload/images/69/cc/69ccad92987b03965b3a341e6ae58899.jpg>
14. Строительство старого Ивановского цирка. 1933. URL: <https://pbs.twimg.com/media/CHjN6UBXAAAvSWT.jpg>
15. **Тимофеев М.Ю.** От «Красного Манчестера» к «Красному Диснейленду»: конструктивистская архитектура и стратегии позиционирования. *Quaestio Rossica*. 2016. Т. 4. № 3. С. 72-92. URL: https://elar.ufrfu.ru/bitstream/10995/41248/1/q3_2016_05.pdf
16. **Карпов В.В.** Типология и идеология. Возвращение М.Я. Гинзбурга. *Academia. Архитектура и строительство*. 2013. № 3. С. 5-18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-i-ideologiya-vozvrashchenie-m-ya-ginzburga>
17. **Шахнов И.Е.** Лучшие примеры советского зодчества в стиле конструктивизма 1920-х годов в Иваново-Вознесенске. Творческий путь архитектора С.А. Минофьева. *Архитектура и строительство России*. 2014. № 4. С. 15-19.

Поступила в редакцию 20.09.2021
Принята к опубликованию 20.09.2021

REFERENCES

1. **Petrova E.S.** Soviet Constructivism. *The Heritage Institute Journal*. 2019. N 4 (19). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovetskiy-konstruktivizm> (in Russian).
2. **Starkov I.** Textile experiments of Popova and Stepanova. *Arzamas.academy*. URL: <https://arzamas.academy/materials/43> (in Russian).
3. **Lizon P.** Palace of the Soviets: Change of Direction in Soviet Architecture, 1920-1940. *Passeggiata Pr.* 1989. 244 p.
4. **Oswald A., Meuser Ph., Krikaljow S.** Architektur für die russische Raumfahrt vom Konstruktivismus zur Kosmonautik: Pläne, Projekte und Bauten. Berlin: DOM Publ. 2013. 411 p.
5. **Gabo N.** Constructions for real life. Tate Publishing, 2020. 155 p.
6. **Sedova L.A., Kuprina A.M.** Monuments of constructivism in Ivanovo: constructivism in action. *Materialy` VIII Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Studencheskij nauchny forum-2016»* URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016025586> (in Russian).
7. Districts of the Ivanovo industrial region. Part. 1. Economic characteristics. M.-Ivanovo. 1933. 296 p. (in Russian).
8. **Lichak N.A.** The destruction of monuments of church architecture in the Ivanovo-Voznesenskaya province in the 1920s-1930s. *Izvestiya TulGU. Gumanitarny`e nauki*. 2010. N 2. P. 83-91 (in Russian).
9. The spinning factory "Krasnaya Talka". URL: <https://kartarf.ru/images/heritage/1080/2/25641.jpg>
10. The factory named after F.E. Dzerzhinsky. URL: https://culture37.ru/wp-content/uploads/2017/07/DSC_0246-1-1024x685.jpg
11. **Timofeev M.Yu.** The hidden constructivism of Ivanovo-Voznesensk. *Russkoje iskusstvo*. 2016. N 1(49). P. 16-23. URL: http://www.rusiskusstvo.ru/content/files/2016_1/Full/16-23_Timofeev%20f.pdf (in Russian).



12. Ivanovo. The objects of interest. "House-Ship". URL: <https://avia-mir.ru/Dostoprimechatelnosti/dom%20korabl.jpg>
13. Ivsel`bank building. URL: <http://theconstructivistproject.com/upload/images/69/cc/69ccad92987b03965b3a341e6ae58899.jpg>
14. Construction of the old Ivanovo Circus. 1933. URL: <https://pbs.twimg.com/media/CHjN6UBXAAAvSWT.jpg>
15. **Timofeev M.Yu.** From 'red Manchester' to 'red Disneyland': constructivist architecture and the representation of Ivanovo. *Quaestio Rossica*. P. 72-92. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/41248/1/qr_3_2016_05.pdf (in Russian).
16. **Karpov V.V.** Typology and ideology. Moses Ginzburg revisited. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2013. N 3. P. 5-18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-i-ideologiya-vozvrashchenie-m-ya-ginzburga> (in Russian).
17. **Shakhnov I.E.** The best examples of Soviet architecture in the style of constructivism of the 1920s in Ivanovo-Voznesensk. Creative career of the architect S.A. Minofyev. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2014. N 4. P. 15-19 (in Russian).

Received 20.09.2021

Accepted 20.09.2021



ABSTRACTS

A.L. BALUSHKIN

**REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS
WITH DIFFERENT METHODS OF ARMOURING FIXING**

Key words: concrete-to-steel bond, compound bar, distributed contact, discrete contact, discrete crack, shear bond stiffness, post-tensioned structures, monostrand.

The article considers the different types of reinforced concrete slabs for construction. They have different features for fixing the reinforcing element in concrete. To determine the parameters of the stress-strain state of a reinforced concrete element we use the A. R. Rzhantsyn's compound bar model. It was adapted to solve problems taking into account the nonlinear effects accompanying the deformation process of a reinforced rod. A specific feature of the approach is the possibility of modelling the crack formation process as a system of evolving discrete cracks. The results allow to introduce different types of shear bond stiffness into the calculation. The method considers the traditional distributed type of contact between reinforcement and concrete. The study also presents an approach to account for the discrete type of contact both between the reinforcement and the concrete elements, which occurs in reinforced concrete structures as well as in post-tensioned structures.

The proposed model allows the consideration of reinforced concrete structures with regular reinforcement. It is also possible to determine the forces for prestressed and post-stressed elements. The results are presented as finite formulas and implemented the numerical-analytical approach.

A.A. OVCHINNIKOV, D.V. OBRUCHEV, I.N. DANILOV

**COMPOSITE MATERIALS BASED
ON POLYSTRUCTURAL INTEGRATION OF HETEROGENEOUS MATERIALS**

Key words: dry mix mortar, restoration, hollow glass microspheres, lightweight structures building materials, composites, composite materials, polystructural integration, poly-structural theory of concrete, concrete, variotropic structure.

The article aims to generalize the theoretical concepts of the dependence of the performance characteristics of composite materials on their composition and structure. The authors formulate the provisions on the influence of components on various structural levels of the composite in terms of the concrete polystructural theory. Also the article provides the possibility of high-quality control of the properties of materials and final objects of urban infrastructure based on them. The article analyzes the features of technological and design solutions for small architectural forms used to provide the conditions for improving the quality and comfort of the urban environment and participating in measures to improve the urban environment. Also we consider existing and promising options for using composite



materials in the production of of the urban environment objects. And carry out the main properties of composite materials deconstruction in terms of the levels of organization of the composite structure. We proposed the theoretical solutions for the integration of dissimilar materials into a single composite at various structural levels. The article presents the results of experiments on the selection and optimization of the structure of the composite. These provide the effective heterogeneous elements activity, which ensure the rational control the urban infrastructure final object properties, taking into account the operating conditions requirements.

A.N. BLAZNOV, V.B. MARKIN, V.F. SAVIN, V.V. FIRSOV,

A.A. GENINA, E.G. SAKOSHEV

THE METHOD OF STUDYING THE DURABILITY OF FIBERGLASS CONSTRUCTION REINFORCEMENT

Key words: fiberglass-reinforced bar, long-time strength, durability, test method, statistical data processing, distribution law.

We demonstrate methods for long-term testing of construction composites and statistical processing through examining the durability of the fiberglass-reinforced bar specimens under continuous flexural load at -30°C. Prolonged flexural test apparatuses allow to load by 20 samples simultaneously. The strength laws of the experimentally obtained sample distributions correspond to a normal distribution, while the durability laws correspond to a logarithmic-normal distribution. Guidelines are given on the reasonable choice of a permanent load based on a strength determination that would result in the destruction of most of the samples over a period of up to three months. The invention relates to an algorithm for conducting long-term tests and to a method for mathematically co-processing statistical results of strength and durability for generating power relationships. The results of the long-term tests of fiberglass-reinforced bar samples are given in the range of temperatures from minus 30 to plus 50°C. The proposed method produces relationships and makes it possible to predict a value of a lasting strength of 0.6 for a durability of 100 years. Using the suggested method, relationships have been derived that can predict a long-term strength of 0.6 for durability of 100 years. The results are in accordance with the studies of the other authors.

S.P. RUDOBASHTA

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC HEATING PROCESSES OF BUILDING MATERIALS

Key words: electromagnetic heating, building materials, mathematical modeling, heating dynamics.



The paper considers the depth of penetration of electromagnetic fields into materials as a function of frequency. The author discusses the works on mathematical modelling of electromagnetic heating and drying of materials in the infrared and ultra-high frequency ranges. The article indicates the advantages and disadvantages of analytical and numerical methods for solving problems of electromagnetic product heating. It is noted that the electromagnetic heating of moist building materials is often accompanied by evaporation of moisture. It should be taken into account in the mathematical modelling of their electromagnetic heating process. Further the article highlights the role of heat treatment of concrete, which has become an important stage of the technological process of building materials production. The electro-thermal treatment of reinforced concrete products and electromagnetic heating methods in different frequency ranges are relevant. The article presents the analytical mathematical model of electromagnetic heating of a plate under the influence of a radiation flux penetrating the body according to Booger's law. It takes into account the heat flow to the evaporation of moisture occurring at the surface of the plate, and its convective heat and mass exchange with the external gas medium. We analyse the model for consistency with the real process under infra-red heating conditions by comparing calculated and experimental thermograms. Its relevance to the real process is shown. The author shows the possibility of selecting the required electromagnetic heating process mode by means of numerical computer analysis. The mathematical model considered is recommended for practical application in building technology.

V.M. DUDIN, N.S. SMEKALOV, A.E. OKUTIN

**APPLICATION OF SAPROPEL FROM LAKE NERO, YAROSLAVL REGION, RUSSIA
FOR PRODUCTION OF ROAD CONCRETE MIXTURES**

Key words: road concrete mixture, mineral flour, sapropel, features of road concrete.

Mineral fillers are widely used to improve the water-resisting property and durability of asphalt pavements. Mainly fillers are obtained from carbonate-bearing rocks (dolomite mineral flours). The increasing of road construction leads to the need for increasing of road construction materials, including the mineral flours. Sapropel could help to eliminate this shortage. In the Yaroslavl region, more than 250 million cubic metres of sapropel have accumulated in Lake Nero. It is damaging the lake. To restore the lake's ecosystem, cleaning with sapropel extraction and using for various industries and agriculture are proposed. The road construction can use the high-ash sapropel. It can be used as a mineral flour in production of road concrete mixtures. This paper concerns the possibility of Lake Nero sapropel application for production of road concrete mixtures.

G.V. PROVATOROVA



NANOMODIFIERS IN PRODUCING HIGHER QUALITY PAVING ASPHALT

Key words: paving asphalt, modifier, nanomodifier, carbon nanotubes, rutting, crack resistance, asphalt concrete.

Recently it has become quite important to improve the quality of paving asphalt and study the influence of the properties of the binder on the asphalt concrete performance. Research conducted at the Department of Highways of Vladimir State University has shown that even the most effective modifying additives used in road construction do not always give the required result, or the result is achieved by introducing a significant amount of modifier, which gives a noticeable increase in the cost of binder and asphalt concrete that use it.

The purpose of this work is to select a new (previously not used in the Vladimir region) modifier for bitumen used in road construction companies in the Vladimir region, and study its properties. The results of experiment were used to develop the procedure of experimental tests, determine the properties of obtained modified binder, compare with the properties of original samples, select additives composition, mold and test samples on the obtained modified binder. The results allowed us to conclude that the applied modifier gives better performance than the previously used modifiers.

N.S. SAPRYKINA

SETTLEMENT OF SYNTHETIC RUBBER PLANT IN YAROSLAVL – AVANT-GARDE TYPE OF SOVIET URBAN DEVELOPMENT

Key words: urban planning, architecture, Yaroslavl, constructivism, project, type, Soviet, socialist, working settlement, quarter, sample.

In 1932–1934, a new synthetic rubber plant and a new housing estate for its workers and staff had been constructing in Yaroslavl (Russia, Yaroslavl Oblast). Such a housing residence was called “sotsposelok”, that literally means “social settlement”. Building on the example of this particular “social settlement” and taking into account the main principles of USSR urban planning, the paper establishes the idiosyncrasies of urban planning in the 1920s. The paper argues that a “social settlement” of Yaroslavl is a characteristic of the typological sample of the Soviet era illustrating the doctrine of the Soviet working village and provides new historic facts about urban planning of the city.

N.A. LICHAK

THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTIVISM CONCEPTS IN IVANOVO-VOZNESENSK IN THE 1920S–1930S

Key words: constructivism, architectural projects of Ivanovo-Voznesensk, ideology, “House-bullet”, “Horseshoe”-house, “House-ship”, the Spinning building of the factory “Krasnaya Talka”, the building of F.E. Dzerzhinsky factory.



We study the specific features of new public building construction types in post-revolutionary Russia in Ivanovo-Voznesensk in 1920–1930s. That time the city acquired the administrative status of the centre of new life. This status meant the development of appropriate infrastructure and the integration of the urban area into a plan to realise world-class architectural and engineering ideas. The plans of the socialist construction provided for a complex architectural design of the city, which represents «the ideology of the proletariat» and «powerful tool of class struggle». The active development of textile production and the growth of the urban population along with the transformation of the national way of life caused this change. The projects of the country's leading and local architects, focusing on the functional and structural basis of buildings, laid the foundations of the constructivist manifesto in Ivanovo-Voznesensk, the birthplace of the First Council of Revolutionary Russia. This article considers architectural propaganda projects - factory and housing estates that were designed as ideological centres of urban space.



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 шрифтом *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 сложнэфирной 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).

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



ТОМ 2, ВЫПУСК 3, 2021 | VOL. 2, ISSUE 3

