



ISSN 2587-9006

Воронежский государственный  
технический университет

Химия, физика и механика  
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск 4(31), 2021

ISSN 2587-9006

*ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»*

# **ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

## **НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- МЕХАНИКА ЖИДКИХ СРЕД
- БИОНЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
- ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- ПЕРСОНАЛИИ

**Выпуск № 4 (31), 2021**

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»  
Адрес учредителя и издателя: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 77347 от 05.12.2019).

Главный редактор – д-р хим. наук, проф. О.Б. Рудаков  
Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцев  
Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.А. Небольсин  
Ответственный секретарь – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

**Редакционная коллегия:**

Д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р хим. наук, проф. А.В. Белик (г. Челябинск, ЧГУ), д-р техн. наук, проф. В.В. Белов (г. Тверь, ТвГТУ); д-р техн. наук, проф. А.Ф. Бурьянов (г. Москва, МГСУ), д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф., акад. РАН Иевлев В.М. (г. Москва, МГУ), д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИН); д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин (г. Воронеж, ВГТУ), д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Козлов (г. Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук Д.Н. Коротких (г. Москва, МГСУ); д-р техн. наук, проф. В.Я. Манохин (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. В.Я. Мищенко (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ), д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, проф. Г.В. Несветаев (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, доц. В.А. Небольсин (г. Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук, проф. Г.И. Овчаренко (г. Барнаул, АлтГТУ), д-р техн. наук, проф. С.Л. Подвальный (Воронеж, ВГТУ), д-р техн. наук, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова); д-р техн. наук, проф. Ю.В. Пухаренко (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ); д-р техн. наук, проф. Ш.М. Рахимбаев (г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова); проф. Ф. Рёсснер (Германия, университет им. Карла фон Осецкого), д-р хим. наук, проф. Г.В. Славинская (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Славчева Г.С. (г. Воронеж, ВГТУ), д-р физ.-мат. наук, проф. О.В. Стогней (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. А.А. Трещев (г. Тула, ТулГУ); проф. О.Л. Фиговский (Израиль), д-р техн. наук, проф. О.Н. Филимонова (г. Воронеж, ВГУИТ), д-р техн. наук Н.В. Шелехова (г. Москва, ВНИИПБТ), д-р техн. наук, проф. Е.С. Шинкевич (г. Одесса, Одесский архитектурно-строительный университет, Украина), д-р физ.-мат. наук, проф. М.В. Шитикова (г. Воронеж, ВГТУ).

В издании публикуются результаты научных исследований и производственного опыта сотрудников ВГТУ и других образовательных, научных, научно-производственных организаций по проблемам химии, физики и механики строительных и технических материалов; химической технологии и физико-химических методов диагностики, контроля качества и безопасности материалов, применяющихся в строительстве и технике; по техносферной безопасности.

Издание рекомендуется специалистам по промышленному и гражданскому строительству, материаловедом, технологом, инженерам, научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам архитектурно-строительных и технических учебных заведений.

Перепечатка материалов журнала допускается только с разрешения редакции.

Статьи печатаются в авторской редакции.

Дизайн обложки Н.И. Мироненко

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ком. 6419  
тел.: (473) 2369350, (473)2717617  
E-mail: chemistry@vgasu.vrn.ru, lgkkn@rambler.ru

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Шведова М.А., Артамонова О.В.**

Особенности формирования цементных композиционных материалов при микро- и наномодифицировании многокомпонентными добавками..... 4

**Моргун Л.В., Нагорский В.В., Моргун В.Н.**

Охлажденная вода в одностадийной технологии пенобетонов..... 30

**Белькова Н.А., Иващенко Е.И., Курбатов Д.Е.**

Фибропенобетон неавтоклавно твердения - история вопроса и перспективы развития... 39

**Волков В.В., Гнездилова Е.И., Кукина О.Б., Степанова А.О.**

Влияние минерального состава суспензий дисперсных строительных материалов на краевой угол смачивания..... 51

**Леденев А.А., Перцев В.Т., Барабаш Д.Е., Внуков А.Н., Перова Н.С., Иванова О.М.**

Научно-практические разработки бетонов с улучшенными характеристиками для сооружений военного аэродрома..... 63

**Николенко С.Д., Сазонова С.А., Звягинцева А.В.**

Изгибные прочностные характеристики фибробетонных конструкций..... 77

**МЕХАНИКА ЖИДКИХ СРЕД**

**Кумицкий Б.М., Тульская С.Г., Аралов Е.С., Плаксина Е.В.**

К методике определения коэффициента вязкости аномальных жидкостей..... 94

**БИОНЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Букиа М.С.**

Сосудистые сети в биосовместимых гидрогелях.....106

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Фиговский О.Л.**

Наука и глобальные вызовы XXI века..... 124

**ПЕРСОНАЛИИ**

**Проскурин Д.К., Панфилов Д.В., Свентиков А.А., Рудаков О.Б.**

Памяти профессора Болдырева Александра Михайловича..... 143

УДК 666.972.1

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МИКРО-  
И НАНОМОДИФИЦИРОВАНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ  
ДОБАВКАМИ**

*М.А. Шведова\*, О.В. Артамонова*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Шведова Мария Александровна,*

*E-mail: marishwedowa@mail.ru*

В работе рассмотрены тенденции и проблемы применения добавок для цементных бетонов. Осуществлен анализ отечественной и зарубежной литературы, на основании которого приведены классификации различных добавок (в частности кремнеземсодержащих, суперпластифицирующих нанодобавок). Предложены требования к современным многокомпонентным полифункциональным добавкам для композиционных материалов на основе цемента.

*Ключевые слова: цементные бетоны, микромодифицирование, наномодифицирование, химические добавки, механизмы структурообразования*

**FEATURES OF THE FORMATION OF CEMENT COMPOSITE  
MATERIALS DURING MICRO- AND NANOMODIFICATION WITH  
MULTICOMPONENT ADDITIVES**

*M.A. Shvedova\*, O.V. Artamonova*

\*Corresponding author: Mariia A. Shvedova, E-mail: marishwedova@mail.ru

The paper discusses the trends and problems of the use of additives for cement concretes. The analysis of domestic and foreign literature is carried out, on the basis of which the classifications of various additives (in particular, silica-containing, superplasticizing and nano-additives) are given. The requirements for modern multicomponent multifunctional additives for cement-based composite materials are proposed.

**Keywords:** cement composites, micromodification, nanomodification, chemical additives, mechanisms of structure formation

**Введение.** В настоящее время происходят существенные изменения в технологии композиционных материалов на основе цемента. Появляются новые виды цементных бетонов [1-3] (рис. 1), получение которых тесно связано с применением добавок различной природы и морфологии, отличающихся по своему функциональному назначению.

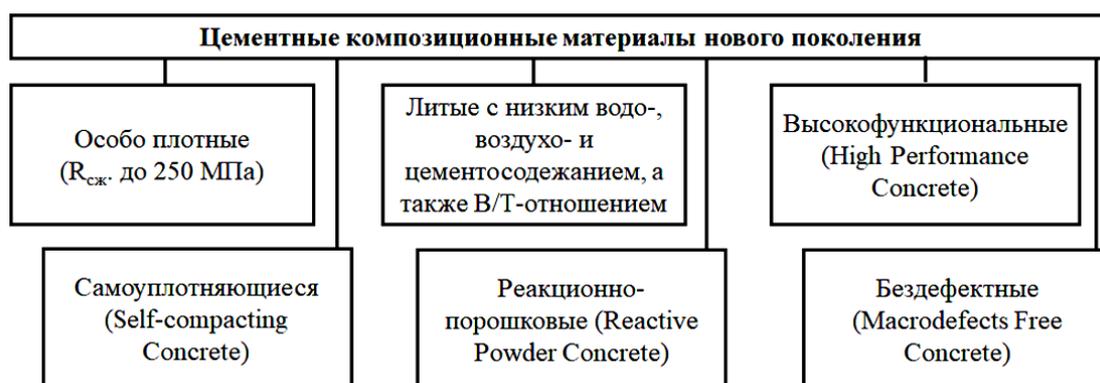


Рис. 1. Виды современных композиционных материалов на основе цемента

Таким образом, создание и применение комплексных многокомпонентных добавок в технологии цементных бетонов является актуальным. Данной про-

блеме посвящено значительное количество исследований, например, [4-8]. При этом, под комплексными добавками понимаются как двухкомпонентные модификаторы, представляющие собой смесь органического поверхностно-активного вещества с минеральным компонентом (обладающим полидисперсным составом), так и многокомпонентные, состоящие из трех и более составляющих. И в первом, и во втором случае механизм действия комплексных добавок будет являться сложным процессом, обусловленным действием каждого компонента.

Стоит отметить, что при рассмотрении вопроса о требованиях к составам многокомпонентных полифункциональных добавок для цементных бетонов стоит уделять внимание экономическому (экономическая целесообразность применения того или иного компонента добавки в категориях «затраты – качество»), экологическому (безопасность производства данного типа добавок и применение в их составе определенного компонента) аспектам, но в большей степени структурообразующему (явления и механизмы формирования структуры строительных композитов, эффекты модифицирования, рациональные дозировки) и технологическому (вопросы совместимости добавок друг с другом и с определенным видом вяжущего вещества, способы введения модификаторов в структуру строительных композитов) аспектам.

Для обеспечения максимальной эффективности многокомпонентной добавки необходимо осуществлять подбор её неорганических компонентов в соответствии с условиями молекулярного, морфологического и топологического отбора [9], а выбор органического компонента должен быть основан на понятии его совместимости с вяжущим веществом. Выполнение указанных условий при создании многокомпонентных добавок позволит, во-первых, достичь и сохранить в течение заданного времени реологические свойства композиционных смесей, а, во-вторых, сформировать оптимальную кристаллическую структуру материала (более плотную, с меньшим количеством пор и пустот) в процессе твердения, что обеспечит необходимые физико-механические свойства цементному бетону.

В связи с этим представляется целесообразным произвести классификацию современных химических добавок для композиционных материалов на основе цемента.

**Классификация химических добавок для цементных бетонов.** Классификацию добавок можно провести по нескольким признакам: по основному эффекту от их действия, по механизму действия, по размеру и соответствующему действию на каждом уровне формирования структуры.

Классификация химических добавок по основному эффекту их действия согласно [10] представлена на рис. 2.

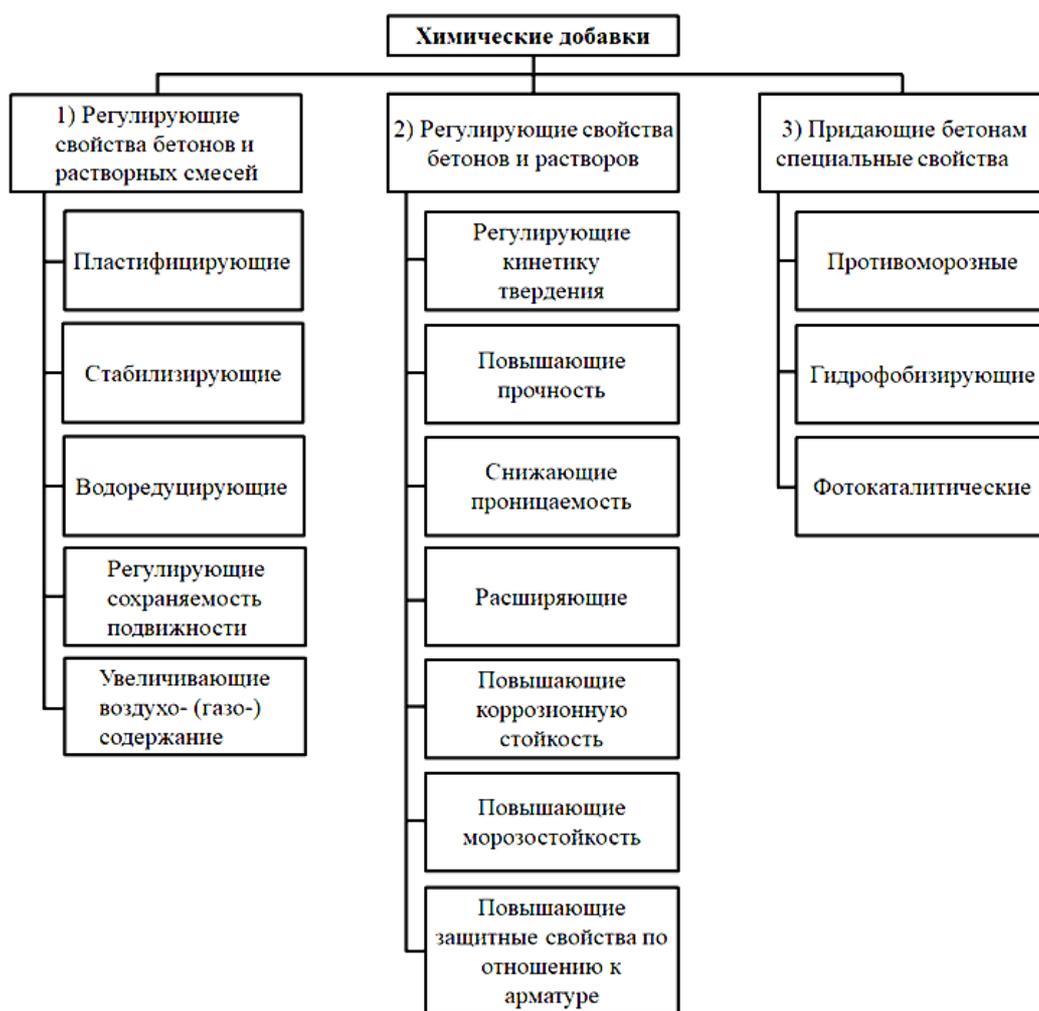


Рис. 2. Классификация химических добавок для цементных бетонов по основному эффекту от их действия

По механизму действия согласно В.Б. Ратинову [11], добавки можно разделить на четыре класса (рис. 3).



Рис. 3. Классификация химических добавок для цементных бетонов по механизмам их действия

К добавкам первого класса относятся неорганические вещества, например,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , а также некоторые органические вещества, например,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Механизм действия таких добавок заключается в том, что они изменяют растворимость, как исходных неустойчивых вяжущих веществ, так и устойчивых конечных продуктов их гидратации – кристаллогидратов.

Веществами, относящимися к добавкам второго класса, являются различные соли калия, натрия, аммония, железа, силикаты калия и натрия, соляная кислота. Механизмы действия добавок второго класса различны и определяются типом реакции, реализующейся при взаимодействии добавки с вяжущим веществом.

Добавки третьего класса (готовые центры кристаллизации) облегчают выделение новой фазы из перенасыщенных растворов, поэтому их введение целесообразно тогда, когда скорость процесса кристаллизации новообразований определяет скорость твердения вяжущего. Результативность данных добавок будет тем выше, чем тоньше будет помол и удельная поверхность частиц добавки. Вещества, являющиеся типичными центрами кристаллизации – сульфат кальция, гидросиликаты кальция.

Добавки четвертого класса представляют собой гидрофилизирующие или гидрофобизирующие поверхностно-активные вещества, в основе действия которых лежат процессы адсорбции или хемосорбции на поверхности зерен вяжущего вещества.

По размеру частиц добавок и ихдействию на каждом уровне формирования структуры цементного бетона, современные химические добавки можно разделить на микро-, ультрамикро- и нанодобавки.

Средний размер частиц *микродобавок* составляет от 1 до нескольких микрон, а их дозировка зависит от многих факторов (тип вяжущего, режимы и условия твердения, наличие металлических армирующих элементов и т.д.) и может варьироваться в широком диапазоне (от 0,1 до 40 %). К типичным микродобавкам относятся микрокремнезем, метакаолин, тонкомолотый кварцевый песок, мел, суперпластификаторы. Кроме того, к добавкам, проявляющим свое действие на микроуровне можно отнести различные виды волокон соответствующего размера (стеклянное, базальтовое, полипропиленовое).

Такие добавки оказывают структурообразующее влияние на микроуровне формирования цементного бетона (стадии агломерации и самопроизвольного структурообразования частиц). При этом, механизмы действия и результаты модифицирования могут быть различными в зависимости от вида добавки.

*Ультрамикродобавки* имеют средний размер частиц от 100 нм до 1 микрометра. Дозировка таких добавок, как правило, составляет 5-10 %. К таким добавкам можно отнести различные неорганические соли, например,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , а также органические вещества, например, камедь  $((\text{C}_{35}\text{H}_{49}\text{O}_{29})_n)$  и стеарат натрия  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COONa})$ .

Структурообразующее влияние данных добавок проявляется на микро- и ультрамикроуровнях (стадии роста, агломерации и самопроизвольного структурообразования частиц). Механизмы действия и соответствующие результаты модифицирования будут определяться видом добавки.

Нанодобавки представляют собой вещества со средним размером частиц от 1 до 100 нм. Дозировка таких добавок в зависимости от природы и морфологии используемых наноразмерных частиц лежит в диапазоне 0,00001-2 %.

Действие таких добавок начинается на наноуровне (стадия зарождения твердой фазы) и косвенно проявляется на ультрамикроруровне (стадия роста частиц). Это обусловлено размером частиц, их высокими значениями поверхностной энергии и, соответственно, значительной активностью. В связи с этим, частицы нанодобавок способны выполнять каталитическую роль в процессах кристаллизации новообразований, а также принимать непосредственное участие в гетерогенных процессах фазообразования, понижая основность гидратных соединений цементного камня. Эти факторы обуславливают результаты модифицирования – ускорение процессов схватывания, гидратации и набора прочности композиционного материала, а также его упрочнение.

На основании приведенных классификаций и анализа литературных источников были определены основные виды микро-, ультрамикро- и нанодобавок, применяемых в технологии цементных бетонов, которые представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

Основные виды добавок, применяемых в производстве цементных бетонов

Добавка	Механизм действия // роль добавки в структуре композита	Основной технологический эффект	Ссылка
1	2	3	4
<i>Микродобавки</i>			
Микрокремнезем	Повышение плотности упаковки системы сложения дисперсных частиц; изменение структуры пористости материала; непосредственное химическое участие частиц в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений // структурообразующая роль	Ускорение процесса схватывания и повышение формоустойчивости смеси; ускорение процессов гидратации, набора прочности и повышение прочностных характеристик композита на ранних и поздних сроках твердения.	[8, 14 – 17]
Метакаолин			[18, 19]
Полипропиленовое волокно	Зонирование структуры твердения; повышение плотности упаковки системы сложения дисперсных частиц; изменение структуры пористости материала // армирующая роль	Повышение пластичности, уменьшение плотности и расслоения смеси; снижение трещиностойкости, повышение прочности при сжатии, водопроницаемости, морозостойкости композита.	[23 – 26]

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Супер-пластификаторы	Изменение условий растворения вяжущего вещества // пластифицирующая роль	Замедление процесса схватывания, повышение пластичности, снижение расслоения смеси; замедление процессов гидратации и схватывания, снижение прочностных свойств композитана ранних сроках твердения.	[27, 28]
<i>Ультрамикродобавки</i>			
Натриевое жидкое стекло	Повышение плотности упаковки системы сложения дисперсных частиц; изменение структуры пористости материала; непосредственное химическое участие частиц в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений // структурообразующая роль	Ускорение процесса схватывания, повышение пластичности и формоустойчивости смеси; ускорение процессов гидратации, набора прочности.	[20, 21]
CaCO <sub>3</sub>			
<i>Нанодобавки</i>			
SiO <sub>2</sub>	Непосредственное химическое участие частиц в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений; ускорение выделения новой фазы из перенасыщенных растворов // структурообразующая роль	Ускорение процесса схватывания и повышение формоустойчивости смеси; ускорение процесса гидратации и повышение прочностных характеристик композита на ранних сроках твердения.	[33 – 37]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Наноглины			
TiO <sub>2</sub>	Ускорение выделения новой фазы из перенасыщенных растворов // фотокаталитическая роль	Самоочищение поверхности композита.	
Углеродные нанотрубки	Зонирование структуры твердения // армирующая роль	Повышение пластичности, уменьшение плотности и расслоения смеси; снижение трещиностойкости, повышение прочности при сжатии, водопроницаемости, морозостойкости композита.	[38 – 40]

### Кремнеземсодержащие добавки в технологии цементных бетонов.

Поскольку основным продуктом гидратации портландцемента является пористый аморфно-кристаллический C – S – H – гель, который сформирован преимущественно мостиковыми силикатами, то для совершенствования процессов гидратации и формирования структуры цементных бетонов целесообразным

будет введение в исходную сырьевую смесь добавок на основе аморфизированного  $\text{SiO}_2$ . Стоит отметить, что степень и механизм влияния таких добавок на структурообразование и, соответственно, физико-механические свойства цементных бетонов будут различными в зависимости от их природы и дисперсности [33].

Наиболее известной и широко применяемой добавкой на основе аморфного  $\text{SiO}_2$  является микрокремнезем. Он представляет собой побочный продукт (пыль газоочистки) производства кристаллического кремния, ферросилиция, ферросиликохрома и других ферросплавов.

Согласно [13] на сегодняшний день существуют следующие марки микрокремнезема (цифровой индекс указывает на минимально допустимое содержание в материале диоксида кремния в процентах):

- неуплотненный – МК-85, МК-65;
- уплотненный – МКУ-85, МКУ-65;
- в виде суспензии – МКС-85.

Анализ литературных данных [14-16] показывает, что введение в исходную сырьевую смесь микрокремнезема оказывает положительное влияние на структуру и физико-механические свойства бетона. Однако, его использование, как самостоятельной добавки приводит к увеличению водопотребности бетонной смеси. В связи с этим в микрокремнезем применяется либо в комплексе с суперпластификатором [14], либо подвергается дополнительной активации различными способами [15, 16].

Нужно заметить, что в настоящее время существуют промышленные органиано-минеральные добавки на основе микрокремнезема типа МБ. Такие добавки не только улучшают структуру и свойства цементных бетонов, но и обладают технологическими свойствами, необходимыми при транспортировке, приемке, хранении и дозировании [17].

Еще одной распространенной кремнеземсодержащей добавкой является метакаолин, который представляет собой продукт дегидратации каолиновой глины – аморфный гидравлически активный алюмосиликат. По своей химиче-

ской природе метакаолин существенно отличается от микрокремнезема, представляя собой смесь аморфного кремнезема и глинозема практически в равных количествах. Частицы метакаолина имеют пластинчатую форму, что обуславливает их высокую удельную поверхность (до 30 м<sup>2</sup>/г) при размере 1-5 мкм. По эффективности и механизму влияния метакаолин подобен микрокремнезему – вступая во взаимодействие с гидроксидом кальция Ca(OH)<sub>2</sub>, он образует низкоосновные гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция. При этом формируется улучшенная структура цементного камня, обеспечивающая повышенную прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона [18, 19].

Натриевое или калиевое жидкое стекло представляет собой водный раствор силиката натрия или калия (Na<sub>2</sub>O·(SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, K<sub>2</sub>O·(SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>) и в большинстве случаев применяется при создании жаропрочных цементных бетонов, композиционных материалов на основе шлако-щелочного вяжущего, а также в составе специальных смесей для пропитки поверхности бетона с целью её сохранения. Однако, известны исследования [20-22], в которых изучено влияние как активированных водных растворов, так и комплексных добавок на основе жидкого натриевого стекла на свойства цементных бетонов. Показано, что применение таких добавок способствует ускорению сроков схватывания цементного теста, снижению водопоглощения цементного камня, увеличению прочностных характеристик мелкозернистого бетона за счет формирования оптимальной структуры цементного камня и снижения свободного Ca(OH)<sub>2</sub>.

**Микроармирование цементных бетонов** позволяет повысить их физико-механические характеристики, снизить величину усадочных деформаций, повысить трещиностойкость. К основным видам волокон, применяемых в качестве микроармирующих компонентов относятся стальное, стекловолокно, базальтовое и полипропиленовое. Все виды данных волокон представляют собой волокна или полоски (в случае стального волокна – проволоки и пластинки) определенных размеров [23].

Технологические свойства, достигаемые при использовании того или иного волокна, а также преимущества их использования представлены в табл. 2.

## Основные виды волокон, применяемые в технологии цементных бетонов

Вид волокна	Достигаемые технологические свойства	Преимущества использования
Стальное	1) Увеличение прочности при сжатии (растяжении) и на изгиб; 2) повышение термической устойчивости; 3) снижение расхода материалов при строительстве;	- Снижение толщины бетонирования и массы конструкции без потери несущей способности; - повышение устойчивости к динамическим нагрузкам; - улучшение гидроизоляционных характеристик сооружений.
Стекловолокно	4) увеличение степени сопротивления трещинообразованию.	- Повышение ударопрочности композита; - высокая плотность и равномерность армирования.
Базальтовое		- Обладает электроизоляционными свойствами; - не поддерживает горения; - экологичность.
Полипропиленовое		- Повышение пластичности смеси; - уменьшение плотности смеси; - повышение износостойкости конструкций; - повышение водопроницаемости и морозостойкости.

Цементные бетоны, армированные *стальными волокнами*, имеют физико-механические показатели, схожие с железобетоном при уменьшенной до 50 % толщине конструкций, а также обладает повышенными показателями ударной вязкости и износостойкости. К недостаткам стального волокна можно отнести подверженность коррозионным процессам и низкое сцепление с матрицей композиционного материала.

*Стекловолокно* имеет высокую прочность и достаточно высокий модуль Юнга, а также обладает значением плотности, близким к плотности цементного бетона. Это позволяет достичь равномерного распределения волокна в объеме композита. Недостатком стеклянных волокон является низкая щелочная стойкость.

*Базальтовое волокно* – это искусственный неорганический материал, полученный путем плавления базальтовых горных пород. Базальтовое волокно обладает высоким модулем упругости, абсолютной негорючестью (а, следовательно, термостойкостью), нетоксичностью, высокой адгезией, химической стойкостью, не подвержено воздействию микроорганизмов. Цементные бетоны, армированные базальтовой фиброй, характеризуются высокими показателями

трещиностойкости, ударной прочности, прочности при растяжении, морозостойкости, а также обладают высокой стойкостью к коррозии. Главный недостаток базальтового волокна – коррозия при гидратации портландцемента.

*Полипропиленовая фибра* производится в виде волокон или в форме тонких полос. Она имеет такие характеристики как относительно высокие температуры воспламенения и размягчения, щелочестойкость, кислото- и солестойкость, устойчивость к различным видам коррозии.

Эффективность дисперсного армирования цементных бетонов различными видами фибр показана в работах [24-26].

### **Суперпластифицирующие добавки в технологии цементных бетонов.**

Суперпластифицирующие добавки (суперпластификаторы (СП)) [27, 28] представляют собой органические поверхностно-активные вещества, хорошо растворимые в воде и используемые как для регулирования реологических характеристик (сроки схватывания, текучесть, удобоукладываемость) цементного теста и бетонов, так и для повышения показателей их однородности, прочности, пористости, непроницаемости и других. Кроме того, СП могут также обладать рядом других свойств, например, воздухововлекающими, микропенообразующими, гидрофобизирующими, бактерицидными. Стоит отметить, что пластифицирующее и разжижающее действие современных СП на цементную смесь может быть обусловлено двумя одновременно проявляющимися механизмами – электростатическим и стерическим [27, 28]. При этом, в зависимости от вида и количества функциональных групп, а также наличия привитых боковых цепей в молекуле СП может преобладать один из указанных механизмов.

Используемые в настоящее время СП можно классифицировать по химическому составу и способности к водоредуцированию СП [28]:

- лигносульфонаты (ЛС). Их способность к водоредуцированию составляет всего лишь 10 %;
- добавки на основе продуктов поликонденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида имеют степень полимеризации 5-10 и молекулярную массу 1000-2000. Они позволяют снизить расход воды до 30 %;

- меламинасульфонаты (МС) – синтетические полимеры со степенью полимеризации 50-60 и молекулярной массой 12 000-15 000. При их использовании расход воды в бетоне можно снизить до 20-30 %;

- полиакрилаты (ПА) и поликарбоксилатные эфиры (ПЭ). Водоредуцирующий эффект от применения СП на основе данных соединений может составлять до 40 %.

Благодаря высокой эффективности, доступности, отсутствию отрицательного действия на бетон и арматуру, относительно невысокой стоимости наиболее широкое применение в строительстве находят суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, наиболее крупными поставщиками которых являются зарубежные компании BASF (серия добавок под марками Glenium® и Glenium®SKY), Sika (продукты из серии Sika®ViscoCrete®), MC-Chemie (добавки марок PowerFlow и TechniFlow), а также отечественная компания «Макромер» (например, СП П-11, П-13, П-15, П-16, П-17) [29-32].

**Нанодобавки как эффективные модификаторы структуры и свойств цементных бетонов.** Наночастицы и добавки на их основе являются перспективными модификаторами цементных бетонов, поскольку даже при небольших дозировках (0,00001-1 %) позволяют сократить время схватывания на 1-2 часа, снизить проницаемость готового изделия от 4 до 75 %, а также увеличить его прочностные характеристики на 5-25 % [33].

Наиболее часто для модификации композиционных материалов на основе цемента используют наночастицы оксидов, например, SiO<sub>2</sub> [34], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [35], Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [36], TiO<sub>2</sub> [37], а также углеродные нанотрубки (УНТ) [38, 39], наноглины [40]. Стоит отметить, что диапазон размеров частиц, используемых для модифицирования цементных бетонов, достаточно широк и может варьироваться от 4 до 100 нм.

Основными преимуществами применения наноразмерных добавок в технологии цементных бетонов являются следующие [33, 41]: снижение расслоения смеси и улучшение её удобоукладываемости, связанное с повышением вязкости жидкой фазы; уплотнение упаковки материала на нано- и микроуровне за

счет заполнения пустот между более крупными частицами исходных компонентов системы, а также связывания свободной воды; ускорение процессов гидратации минералов портландцементного клинкера, связанное с тем, что наноразмерные частицы проявляют себя как дополнительные центры зародышеобразования в процессах конденсации гидратных фаз; формирование плотной мелкокристаллической структуры с небольшим содержанием пор и пустот.

Недостатки применения наноразмерных добавок в технологии цементных бетонов [33, 41]: склонность к агломерации, и как следствие, неравномерное распределение в объеме композиционного материала; высокая стоимость; невозможность использования некоторых наноразмерных частиц в технологии литевых бетонов, что связано со снижением пластичности и времени схватывания композиционной смеси; недостаточная изученность вопроса о влиянии наноразмерных частиц на свойства цементных бетонов.

**Систематизация требований к составу многокомпонентных полифункциональных добавок для цементных бетонов.** Обобщая рассмотренные выше литературные источники, а также анализируя результаты собственных исследований [4, 15, 22, 42], можно предположить, что многокомпонентные полифункциональные добавки для современных цементных бетонов должны включать в себя следующие компоненты: неорганический, органический и армирующий (рис. 4).

В качестве *неорганического компонента* целесообразно использовать микро-, ультрамикро- и наночастицы соединений, содержащих диоксид кремния в аморфизированном состоянии, поскольку они будут отвечать условиями молекулярного, морфологического и топологического отбора [13]. Это значит, что единичные молекулы таких частиц обладают структурой и кристаллохимическим строением близким к таковым для минералов цементного клинкера, что, вероятно, позволит им сформировать более плотную, с меньшим количеством пор и пустот кристаллическую структуру материала.

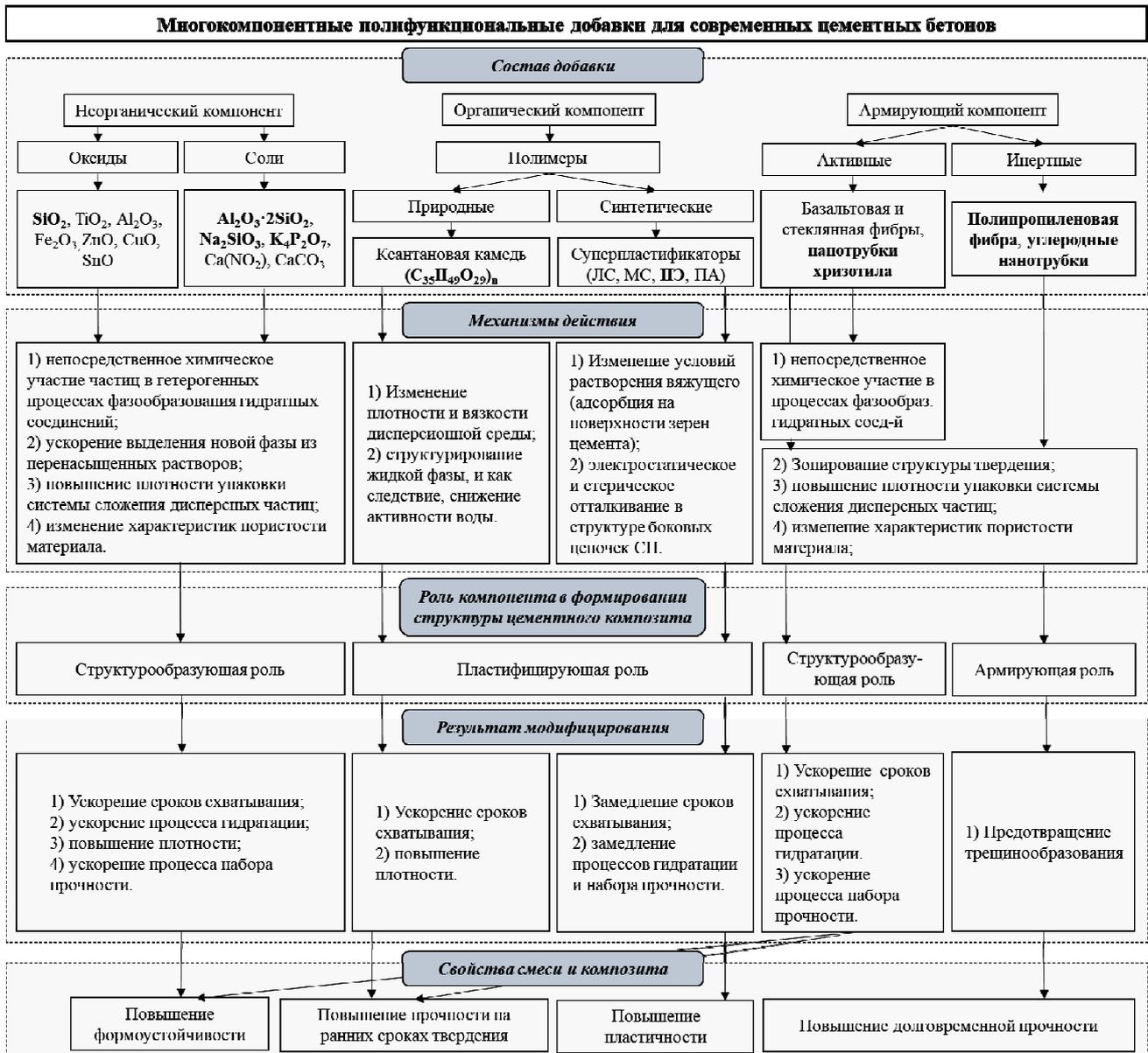


Рис. 4. Систематизация требований к составу многокомпонентных полифункциональных добавок для современных цементных бетонов

В качестве *органического компонента* предлагается использовать СП на основе поликарбоксилатных эфиров. Он позволит, во-первых, придать добавке технологические свойства, необходимые для ее хранения (предотвратить агломерацию частиц неорганического компонента), а, во-вторых, равномерно распределить частицы неорганического и армирующего компонентов в объеме композиционного материала на основе цемента.

Полипропиленовое волокно, в силу своих существенных преимуществ перед другими видами волокон, будет являться оптимальным *армирующим компонентом*.

При этом, структурообразующее участие и модифицирующее влияние компонентов добавки может быть результатом следующих взаимосвязанных механизмов:

- механизма, обеспечивающего повышение плотности упаковки системы сложения дисперсных частиц, уменьшение общей ее пористости, изменение структуры пористости материала. Данный механизм будет реализовываться при введении в систему микро-, ультрамикро- и наноразмерных частиц неорганического компонента или пирофосфатаи камеди, а также при введении полипропиленового волокна;

- механизма, связанного с каталитической ролью частиц неорганического компонента (на основе  $\text{SiO}_2$ ) как центров кристаллизации с соответствующим эффектом понижения энергетического порога этого процесса и его ускорения;

- механизма зонирования структуры твердения полипропиленовыми волокнами;

- механизма, связанного с возможностью непосредственного химического участия частиц неорганического компонента (на основе  $\text{SiO}_2$ ) в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений.

Стоит отметить, что мера реализации указанных механизмов при модифицировании структуры цементных бетонов многокомпонентными полифункциональными добавками будет определяться видом, дисперсностью, характеристиками и дозировкой того или иного компонента в составе конкретной добавки.

**Заключение.** В работе представлен анализ отечественных и зарубежных исследований, посвященных проблемам применения различных добавок при модификации цементных бетонов. Осуществлен краткий обзор наиболее применяемых добавок (кремнеземсодержащих, суперпластифицирующих, наномодификаторов, различных видов волокон) в технологии цементных бетонов. Произведена систематизация полученной информации, на основании которой

предложены требования к составу многокомпонентных полифункциональных добавок для цементных бетонов.

### **Список литературы**

1. Junquan Li, Zemei Wu, Caijun Shi, et al. Durability of ultra-high performance concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 255. P. 119296.
2. Kashani A., Tuan Ngo. Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2020. P. 65-81.
3. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., и др. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8 (34). С. 47-53.
4. Артамонова О.В., Славчева Г.С., Шведова М.А. Исследование микроструктуры цементного камня, модифицированного комплексными нанодобавками // *Научный вестник Воронежского ГАСУ, серия «Физико-химические проблемы строительного материаловедения»*. 2015. №1 (10). С. 80-86.
5. Рахимбаев Ш.М., Минаков С.В. Влияние комплексных органо-минеральных добавок на свойства цементного камня // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2010. № 3 (83). С. 43-46.
6. Fernández J.M., Duran A., Navarro-Blasco I., et al. Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars // *Cement and Concrete Research*. 2013. V. 43. P. 12-24.
7. Артамонова О.В., Славчева Г.С., Чернышов Е.М. Эффективность применения комплексных наноразмерных добавок для цементных систем // *Неорганические материалы*. 2017. Т. 53. №10. С. 1105-1110.
8. Гамалий Е.А., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2009. № 16(149). С. 29-35.

9. Артамонова О.В., Чернышов Е.М. К проблеме концептуальных моделей управления эволюционным маршрутом формирования наномодифицированных систем твердения в структуре строительных композитов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5(713). С. 44-57.
10. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 17 с.
11. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
12. Kumar Nair P.A., Vasconcelos W.L., Paine K., et al. A review on applications of sol-gel science in cement // Construction and Building Materials. 2021. V. 291. P. 123065.
13. ГОСТ Р 58894-2020 Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 15 с.
14. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Кирсанова А.А., и др. Влияние комплекса «микрокремнезем-суперпластификатор» на формирование структуры и свойств цементного камня // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2018. Т. 18, № 1. С. 32-40.
15. Закуражнов М.С., Артамонова О.В., Шведова М.А., и др. Механохимическая активация комплексной добавки на основе микрокремнезема для модифицирования структуры цементного камня // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 125-131.
16. Ткач Е.В., Соловьев В.И., Темирканов Р.И. Цементный бетон с улучшенными физико-механическими свойствами на основе применения активированного микрокремнезема // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Строительство и архитектура. 2019. № 4(77). С. 100-109.
17. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органо-минеральных модификаторов на цементные системы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 1. С. 40-46.

18. Дворкин Л.И., Житковский В.В., Дворкин О.Л., и др. Метакаолин – эффективная минеральная добавка для бетонов // Технологии бетонов. 2015. № 9-10. С. 21-24.

19. Рябова А.А. Исследование длительной прочности стеклофибробетона с минеральными добавками // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 164-169.

20. Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е. Особенности структурообразования в мелкозернистом бетоне на механоактивированном водном растворе силиката натрия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31-2 (50). С. 199-206.

21. Хархардин А.Н., Вишневская Я.Ю., Алфимова Н.И. Повышение эффективности мелкозернистых бетонов при использовании модифицированного портландцементного вяжущего // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 50-56.

22. Шведова М.А. Исследование процессов схватывания и набора прочности цементных систем твердения при микро- и наномодифицировании // Химия, физика и механика материалов. 2021. № 2 (29). С. 79-89.

23. Zeyad A.M. Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9(3). P. 4147-4158.

24. Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю., Ерёмина Н.Е. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой базальтовой фиброй // Технологии бетонов. 2019. № 7-8(156-157). С. 34-42.

25. Баранова А.А., Боброва А.А. Дисперсное армирование ячеистого и мелкозернистого бетонов на основе микрокремнезема // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 4 (31). С. 694-703.

26. Shaikh F.U.A., Luhar S., Arel H.S., Luhar I. Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 232. P. 117152.
27. Камалова З.А., Рахимов Р.З., Ермилова Е.Ю., и др. Суперпластификаторы в технологии изготовления композиционного бетона // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 8. С. 148-152.
28. Юхневский П.И. О механизме пластификации цементных композиций добавками // *Строительная наука и техника*. 2010. № 1-2 (28-29). С. 64-69.
29. [Электронный ресурс] [http://www.know-house.ru/infotek/inf\\_pdf/19\\_basf\\_39.pdf](http://www.know-house.ru/infotek/inf_pdf/19_basf_39.pdf) (дата обращения 25.10.2021 г.).
30. [Электронный ресурс] [https://rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/с/Каталог%20технический%20\(3-е%20издание\).pdf](https://rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/с/Каталог%20технический%20(3-е%20издание).pdf) (дата обращения 25.10.2021г.).
31. [Электронный ресурс] <https://www.mc-bauchemie.ru/assets/downloads/products/ru-RU/katalogi/Tovarniy%20beton.pdf> (дата обращения 25.10.2021 г.).
32. Тарасов В.Н., Лебедев В.С. Отечественные поликарбоксилатные суперпластификаторы производства ООО «НПП «Макромер» для бетона, гипса и строительных смесей // *Технологии бетонов*. 2015. № 1-2. С. 16-18.
33. Reches Y. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 175. P. 483-495.
34. Zang J., Li W., Shen X. The influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the hydration kinetics of portland cement paste / *Ceramics-Silikáty*. 2019. V. 63 (1). P. 86-92.
35. Shao Q., Zheng K., Zhou X., et al. Enhancement of nanoalumina on long-term strength of Portland cement and the relation to its influences on compositional and microstructural aspects // *Cement and Concrete Composites*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.016>.
36. Najafi Kani E., Hossein Rafiean A., Alishah A., et al. The effects of Nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the mechanical, physical and microstructure of cementitious composites // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 266. Part B. P. 121137.

37. Zhang R., Cheng X., Hou P., et al. Influences of nano-TiO<sub>2</sub> on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage // *Construction and Building Materials*. 2015. V. 81. P. 35-41.

38. Nadiv R., Shtein M., Refaeli M. et al. The critical role of nanotube shape in cement composites // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. P. 166-174.

39. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., и др. Модифицирование цементных композитов смешанным нанокремнеземным материалом фуллереноидного типа // *Технологии бетонов*. 2013. № 12 (89). С. 13-15.

40. Dejaeghere I., Sonebi M., Schutter G.D. Influence of nano-clay on rheology, fresh properties, heat of hydration and strength of cement-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 222. P. 73-85.

41. Артамонова О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016. 100 с.

42. Артамонова О.В., Шведова М.А. Нанодобавки как эффективные модификаторы структуры и свойств цементных систем твердения // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 9 (741). С. 124-136.

## **References**

1. JunquanLi, ZemeiWu, CaijunShi, etal. Durability of ultra-high performance concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 255. P. 119296.

2. Kashani A., Tuan Ngo. Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2020. P. 65-81.

3. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznecov Yu.S., etal. [New generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Civil Engineering magazine]*. 2012. No. 8 (34). P. 47-53. (in Russian).

4. Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Shvedova M.A. [Investigation of the microstructure of cement stone modified with complex nanoadditives]. *Nauchnyj vest-*

nik Voronezhskogo GASU, seriya «Fiziko-himicheskie problemy stroitel'nogo materialovedeniya» [Scientific Bulletin of Voronezh GASU, series «Physico-chemical problems of building materials science»]. 2015. No. 1 (10). P. 80-86. (in Russian).

5. Rakhimbayev Sh.M., Minakov S.V. [Influence of complex organomineral additives on the properties of cement stone]. Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury [Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture]. 2010. No. 3 (83). P. 43-46. (in Russian).

6. Fernández J.M., Duran A., Navarro-Blasco I., et al. Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars // Cement and Concrete Research. 2013. V. 43. P. 12-24.

7. Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Effectiveness of combined nanoadditives for cement systems // Inorganic Materials. 2017. V. 53. No. 10. P. 1080-1085.

8. Gamaliy E.A., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. [Structure and properties of cement stone with additives of silica and polycarboxylate plasticizer]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture]. 2009. No. 16(149). P. 29-35. (in Russian).

9. Artamonova O.V., Chernyshov E.M. [On the problem of conceptual models of control of the evolutionary route of formation of nanomodified hardening systems in the structure of building composites]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo [Izvestiya of higher educational institutions. Construction]. 2018. No. 5(713). P. 44-57. (in Russian).

10. GOST 24211-2008 Dobavki dlya betonov i stroitel'nyh rastvorov. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State standard 24211-2008 Additives for concrete and mortar. General technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 17 p. (in Russian).

11. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Dobavki v beton [Additives in concrete]. Moscow, Strojizdat, 1989. 188 p. (in Russian).

12. Kumar Nair P.A., Vasconcelos W.L., Paine K., et al. A review on applications of sol-gel science in cement // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 291. P. 123065.

13. GOST R 58894-2020 Mikrokremszem kondensirovannyj dlya betonov i stroitel'nyh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya [State standard R 58894-2020 Condensed silica for concrete and mortar. Technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2010. 15 p. (in Russian).

14. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Kirsanova A.A., et al. [The effect of the complex «microsilicon - superplasticizer» on the formation of the structure and properties of cement stone]. *Vestnik YUUr GU. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura»* [Bulletin of SUSU. The series «Construction and Architecture»]. 2018. V. 18. No. 1. P. 32-40. (in Russian).

15. Zakurazhnov M.S., Artamonova O.V., Shvedova M.A., et al. [Mechanochemical activation of a complex additive based on silica for modifying the structure of cement stone]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2019. No. 1 (72). P. 125-131. (in Russian).

16. Tkach E.V., Soloviev V.I., Temirkanov R.I. [Cement concrete with improved physical and mechanical properties based on the use of activated silica]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture series]. 2019. No. 4(77). P. 100-109. (in Russian).

17. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. [Some features of the mechanism of action of organomineral modifiers on cement systems]. *Sejsmostojkoestroytel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]. 2017. No. 1. P. 40-46. (in Russian).

18. Dvorkin L.I., Zhitkovsky V.V., Dvorkin O.L., et al. [Metakaolin is an effective mineral additive for concrete]. *Tekhnologii betonov* [Technologies of concrete]. 2015. No. 9-10. P. 21-24. (in Russian).

19. Ryabova A.A. [Investigation of the long-term strength of fiberglass with mineral additives]. Vestnik grazhdanskih inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2017. No. 4 (63). P. 164-169. (in Russian).

20. Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. [Features of structure formation in fine-grained concrete on mechanically activated aqueous solution of sodium silicate]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2013. No. 31-2 (50). P. 199-206. (in Russian).

21. Kharkhardin A.N., Vishnevskaya Ya.Yu., Alfimova N.I. [Improving the efficiency of fine-grained concrete when using a modified Portland cement binder]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universitetaim. V.G. Shuhova [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2009. No. 3. P. 50-56.(in Russian).

22. Shvedova M.A. [Investigation of the processes of setting and strength gain of cement hardening systems during micro- and nanomodification]. Himiya, fizikaimekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]. 2021. No. 2(29). P. 79-89. (in Russian).

23. Zeyad A.M. Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9(3). P. 4147-4158.

24. Pustovgar A.P., Abramova A.Yu., Eremina N.E. [Efficiency of using dispersed reinforcement of concrete and mortar with polypropylene and basalt fiber]. Tekhnologii betonov [Technologies of concrete]. 2019. No. 7-8(156-157). P. 34-42. (in Russian).

25. Baranova A.A., Bobrova A.A. [Dispersed reinforcement of cellular and fine-grained concrete based on microsilicon]. Izvestiyavuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Izvestiyavuzov. Investment. Construction. Realty]. 2019. V. 9. No. 4 (31). P. 694-703. (in Russian).

26. Shaikh F.U.A., Luhar S., Arel H.S., Luhar I. Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 232. P. 117152.
27. Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Ermilova E.Yu., etc. [Superplasticizers in composite concrete manufacturing technology]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]*. 2013. V. 16. No. 8. P. 148-152. (in Russian).
28. Yukhnevsky P.I. [On the mechanism of plasticization of cement compositions with additives]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]*. 2010. No. 1-2 (28-29). P. 64-69. (in Russian).
29. [Electronic resource]. Available at: [http://www.know-house.ru/infotek/inf\\_pdf/19\\_basf\\_39.pdf](http://www.know-house.ru/infotek/inf_pdf/19_basf_39.pdf) (accessed 25 October 2021). (in Russian).
30. [Electronic resource]. Available at: [https://rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/c/Каталог%20технический%20\(3-е%20издание\).pdf](https://rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/c/Каталог%20технический%20(3-е%20издание).pdf) (accessed 25 October 2021). (in Russian).
31. [Electronic resource]. Available at: <https://www.mc-bauchemie.ru/assets/downloads/products/ru-RU/katalogi/Tovarniy%20beton.pdf> (accessed 25 October 2021). (in Russian).
32. Tarasov V.N., Lebedev V.S. [Domestic polycarboxylate superplasticizers manufactured by NPP Makromer LLC for concrete, gypsum and building mixes]. *Tekhnologii betonov [Technologies of concrete]*. 2015. No. 1-2. P. 16-18. (in Russian).
33. Reches Y. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 175. P. 483-495.
34. Zang J., Li W., Shen X. The influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the hydration kinetics of portland cement paste / *Ceramics-Silikáty*. 2019. V. 63 (1). P. 86-92.
35. Shao Q., Zheng K., Zhou X., et al. Enhancement of nanoalumina on long-term strength of Portland cement and the relation to its influences on compositional and microstructural aspects // *Cement and Concrete Composites*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.016>.

36. NajafiKani E., HosseinRafiean A., Alishah A., et al. The effects of Nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the mechanical, physical and microstructure of cementitious composites // Construction and Building Materials. 2021. V. 266. Part B. P. 121137.

37. Zhang R., Cheng X., Hou P., et al. Influences of nano-TiO<sub>2</sub> on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage // Construction and Building Materials. 2015. V. 81. P. 35-41.

38. Nadiv R., Shtein M., Refaeli M. et al. The critical role of nanotube shape in cement composites // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. P. 166-174.

39. PukharenoYu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., et al. [Modification of cement composites with mixed nanocarbon materials of fulleroid type]. Tekhnologii betonov [Technologies of concretes]. 2013. No. 12 (89). P. 13-15. (in Russian).

40. Dejaeghere I., Sonebi M., Schutter G.D. Influence of nano-clay on rheology, fresh properties, heat of hydration and strength of cement-based mortars // Construction and Building Materials. 2019. V. 222. P. 73-85.

41. Artamonova O.V. Sintez nanomodificiruyushchih dobavok dlya tekhnologii stroitel'nyh kompozitov [Synthesis of nanomodifying additives for building composites technology]. Voronezh, Voronezhskij GASU, 2016. 100 p. (in Russian)

42. Artamonova O.V., Shvedova M.A. [Nanoadditives as effective modifiers of the structure and properties of cement hardening systems]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]. 2020. No. 9(741). P. 124-136. (in Russian).

---

**Шведова Мария Александровна** – соискатель ученой степени кандидата наук, инженер кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Артамонова Ольга Владимировна** – д-р техн. наук, проф. кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

УДК 691.666

## **ОХЛАЖДЕННАЯ ВОДА В ОДНОСТАДИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕНОБЕТОНОВ**

*Л.В. Моргун<sup>1\*</sup>, В.В. Нагорский<sup>1</sup>, В.Н. Моргун<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Донской государственной технической университет,  
Российская Федерация, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1*

*<sup>2</sup>Южный федеральный университет,  
Российская Федерация, 344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105*

*\*Адрес для переписки: Моргун Любовь Васильевна,*

*E-mail: konst-lvm@yaandex.ru*

Отражено устоявшееся мнение о том, что приготовление пенобетонных смесей целесообразно осуществлять только на воде комнатной температуры. На основе анализа физических процессов, имеющих место при изготовлении и начальном структурообразовании пенобетонных смесей, рассмотрены рецептурные и технологические факторы, способные влиять на агрегативную и седиментационную устойчивость пенобетонных смесей, изготавливаемых по одностадийной технологии. Приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние температуры воды затворения на скорость фазового перехода пеносмесей «из вязкого в твердое» и механические свойства затвердевшего бетона. Установлено, что уменьшение внутренней энергии воды за счет понижения её температуры, способствует повышению термодинамической стабильности пеносмесей в период преобладания слабых связей между компонентами сырья и, как следствие, обеспечивает комплексное улучшение механических свойств затвердевшего бетона.

*Ключевые слова: пенобетонная смесь, температура воды затворения, прочность бетона*

## **CHILLED WATER IN SINGLE-STAGE FOAM CONCRETE TECHNOLOGY**

*L.V. Morgun<sup>1\*</sup>, V.V. Nagorsky<sup>1</sup>, V.N. Morgun<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Don State Technical University,*

*Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1*

*<sup>2</sup>Southern Federal University,*

*Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, B. Sadovaya str., 105*

*\*Corresponding author: Morgun Lyubov Vasilyevna,*

*E-mail: konst-lvm@yaandex.ru*

The well-established opinion is reflected that it is advisable to prepare foam concrete mixtures only on water at room temperature. Based on the analysis of the physical processes that take place during the manufacture and initial structuring of foam concrete, the compounding and technological factors that can influence the aggregative and sedimentation stability of foam concrete mixtures manufactured using single-stage technology are considered. The results of experimental studies reflecting the influence of the mixing water temperature on the rate of phase transition of foam mixtures «from viscous to solid» and the mechanical properties of hardened concrete are presented. It is established that a decrease in the internal energy of water due to a decrease in its temperature contributes to an increase in the thermodynamic stability of foam mixtures during the predominance of weak bonds between the components of raw materials and, as a result, provides a comprehensive improvement in the mechanical properties of hardened concrete.

***Keywords:*** *foam concrete mixture, mixing water temperature, concrete strength*

**Введение.** Принято считать [1, 2], что структурная устойчивость пенобетонных смесей чрезвычайно чувствительна к температуре воды затворения и температуре окружающей среды. При резких её колебаниях авторы [1-3] отмечают повышенную склонность смесей к расслоению и объему утрачиваемой при фазовом переходе «из вязкого в твердое» дисперсной газовой фазы. Не оспаривая в принципе, сложившегося мнения, хотелось бы более подробно рассмотреть причины такой чувствительности для того, чтобы с позиций анализа реально происходящих в смесях физических процессов попытаться найти прак-

тические приемы, позволяющие повысить агрегативную и седиментационную устойчивость пенобетонных смесей.

### **Постановка задачи и анализ**

Рассмотрим такие смеси на этапе раннего формирования каменной структуры. Они содержат воду в количестве, превышающем половину объема плотной составляющей. Причем плотность компонентов дисперсии (газовых включений, цемента и заполнителя) рознится более чем в 100 раз [4]. При перемешивании сырья в турбулентных смесителях, поверхностно-активные вещества (ПАВ), вовлекающие в цементно-песчаный шликер, дисперсную газовую фазу (воздух), переводят часть физически свободной воды затворения в пенные пленки, в которых вода после завершения процесса перемешивания уже не подчиняется гравитационным силам потому, что связана энергетическим потенциалом ПАВ.

Достигнутая в процессе перемешивания агрегативная устойчивость обеспечивается в таких системах за счет силкапиллярного стяжения, развивающихся в пленочной воде, т.е. физически связанной [4, 5]. Прочность связи между молекулами воды по мнению Б.В. Дерягина [6, с.9] в любой момент времени регулируется особенностями структурной сетки еѐмежмолекулярных водородных связей. Структура сетки водородных связей воды формируется под действием поверхностных сил энергетически активных компонентов смесей [5, 6]. В пенобетонных смесях такими компонентами являются:

- положительно заряженные фрагменты молекул ПАВ, осуществляющие захват дисперсной газовой фазы [7, 8];
- отрицательно заряженные фрагменты молекул ПАВ, физически связывающие [7, 8] свободную воду затворения;
- дисперсные частицы цементного вяжущего и заполнителя.

Известно, что любые цементосодержащие бетонные смеси, в начальный период структурообразования характеризуются интенсивным протеканием энерго- и массообменных процессов с участием воды [9] и выделением тепла. Они заключаются в химической и адсорбционной диспергации клинкерных

минералов цемента [5], образовании и росте гидратных соединений, обеспечивающих схватывание пенобетонной смеси. По мере их развития физически слабо связанная вода переходит в более прочно связанную, или химически связанную.

Важно учитывать, что при гомогенизации компонентов пенобетонных смесей не все молекулы ПАВ из водной среды способны переместиться на границу раздела «газ-жидкость» [5, 7, 10]. Часть ПАВ, распавшихся на ионы, остается в жидкой фазе пеносмеси и не оказывает негативного влияния на её структурную устойчивость до тех пор до тех пор, пока воды достаточно для сохранения ПАВ в ионном виде.

Поскольку с течением времени количество воды в любой бетонной смеси уменьшается в связи с её переходом в химически связанное состояние, то возникают условия для возврата ионов ПАВ сначала в целостные молекулы, а затем, возможно и достижение критической концентрации мицеллообразования (ККМ) в жидкой фазе пенобетонной смеси.

ККМ в пеноструктурах ведет к скачкообразному изменению сил поверхностного натяжения [11], что в технологии пенобетонных смесей обеспечивает перестройку структуры дисперсной газовой фазы, заключающейся с одной стороны в образовании мицелл ПАВ в остающемся объеме жидкости, а с другой стороны в укрупнении размеров пленок ПАВ, удерживающих дисперсную газовую фазу внутри цементно-песчаного шликера. Оба результата проявления ККМ в пенобетонных смесях приводят к ухудшению физических и механических свойств затвердевшего бетона. Следовательно, для совершенствования технологии этого энергоэффективного материала необходим поиск приемов, исключающих достижение ККМ в период, когда прочность межпоровых перегородок пенобетона недостаточна для сопротивления скачкам поверхностного натяжения в пенных пленках. Если процесс укрупнения дисперсной газовой фазы коррелирует с ростом прочности кристаллических новообразований в межпоровых перегородках, то описанные выше массообменные процессы не

смогут привести к нарушению структурной устойчивости газонаполненного бетона в период фазового перехода «из вязкого в твердое».

Анализ факторов, влияющих на способность ПАВ находиться в растворах в ионном, молекулярном или мицеллярном состояниях показал, что растворимость ПАВ всегда зависит от температуры растворителя [11]. Чем выше температура растворителя, тем большей может быть в нем концентрация ПАВ до достижения ККМ. Поскольку ПАВ все свои массообменные процессы, важные для формирования дисперсной газовой фазы и структурной устойчивости пенобетонных смесей осуществляет в воде, было принято решение об экспериментальной оценке влияния температуры воды затворения на реологические свойства смесей и физико-механические свойства пенобетонов.

### **Результаты и обсуждение**

Для осуществления экспериментальных исследований готовились пеносмеси дисперсно армированные синтетическим волокном в количестве 1% от массы цемента. Соотношение между цементом и заполнителем было постоянным и составляло по массе 1:1. Расход воды также был принят постоянным. Варьировался только расход синтетического пенообразователя «Ареком-4», рабочая концентрация которого по паспортным данным составляла 24,5%.

В ходе выполнения эксперимента контролировали (табл. 1):

- величину рационального расхода пенообразователя (ПО);
- скорость фазового перехода по кинетике пластической прочности смесей [12] в период раннего структурообразования;
- величину механической прочности бетона в возрасте 28 дней нормального твердения.

В примечаниях зафиксированы результаты наблюдений за смесями после их укладки в 5 литровые емкости с высотой слоя 300 мм. Часть изготовленных смесей имела избыточную пленку воды на поверхности, а затем была замечена их осадка. Такие смеси отмечены знаком – <sup>v</sup>. Смесей, которые в ходе отвердевания утрачивали часть вовлеченной дисперсной газовой фазы, отмечены знаком – \*.

Таблица 1

Влияние температуры воды затворения на кинетику пластической прочностипенобетонных смесей и плотность бетона при различных расходах пенообразователя

Продолжительность фазового перехода, мин	Начальная температура воды затворения, °С										
	+4±2					+20±2					
	Расход пенообразователя, % от количества воды										
	0,18 <sup>v</sup>	0,21 <sup>v</sup>	0,24	0,27*	0,3**	0,18 <sup>v</sup>	0,21 <sup>v</sup>	0,24 <sup>v</sup>	0,27 <sup>v</sup>	0,3	0,33*
	Пластическая прочность, Па										
0	51	55	56	51	45	27	36	40	42	45	43
30	56	57	57	52	42	30	42	47	60	62	55
60	69	60	66	59	54	44	55	60	65	79	59
180	72	75	152	103	147	53	128	139	169	184	100
240	80	97	235	201	238	67	143	154	168	191	197
300	130	191	512	467	500	99	187	260	362	446	434
360	229	219	685	3029	3749	113	206	783	1453	1576	1130
480	590	3720	6123	10080	11653	323	2642	3986	4889	5965	3780
540	1342	11472	14945	13920	13637	1028	3246	5300	7396	8950	5950
600	6400	20489	22458	18268	1770	3234	8175	8072	10100	10825	8282
Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	1195	984	985	1105	1118	1342	1322	1187	1110	1023	1114
Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	972	763	760	885	912	1153	1098	965	814	768	891

**Примечания:**

<sup>v</sup> – значок отражающий осадку смеси в результате расслоения;

\*- на поверхности смесей наблюдались редкие проявления коалесценции в виде всплывающих газовых включений диаметром 1...3 мм, осадки не происходило;

\*\* на поверхности смесей наблюдались проявления коалесценции в виде всплывающих газовых включений диаметром 5...10 мм, итоговая осадка смеси по высоте составила 10...20%.

Из данных, приведенных в табл. 1 следует, что расход пенообразователя оказывает важное влияние на плотность смесей и их структурную устойчивость во времени. Бетонные смеси, не утратившие дисперсной газовой фазы в результате коалесценции и затворенные холодной водой достигли пластической прочности, превышающей 200 Па, через 240 минут. А смесям, затворенным

теплой водой, понадобилось большее время. Этот результат отражает влияние растворимости ПАВ в воде на скорость формирования кристаллических сростков в пенобетоне. При большем содержании ПАВ в жидкой фазе имеет место замедление процесса массопереноса, формирующее кристаллические сростки цементного камня в межпоровых перегородках.

Минимальная плотность затвердевшего бетона достигнута в смесях, обладающих максимальным объемом вовлеченной дисперсной газовой фазы. Эксперимент показал, что для получения такого бетона при затворении холодной водой требуется 0,24% пенообразователя «Ареком-4», а при использовании теплой существенно больше, почти на 20%. Полагаем, что полученный результат так же зависит от меры растворимости ПАВ в воде.

Между плотностью и прочностью любых цементосодержащих материалов существует корреляционная зависимость, чем больше плотность, тем больше должна быть прочность. Данные таблицы 2 позволяют утверждать, что в пенобетонах на эту зависимость накладывает свои ограничения расход пенообразователя. При его оптимальном расходе получены почти одинаковые минимальные плотности бетонов при разных температурах воды затворения, но обладающие существенно различными механическими свойствами.

**Таблица 2**

Механические свойства исследованных пенобетонов

Температура воды затворения, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание ПО, %	Прочность, Мпа		Коэф. вариации прочности, %	
			при сжатии	растяжение при изгибе	при сжатии	растяжение при изгибе
4	972	0,18	4,8	1,9	7,5	9,0
4	763	0,21	4,5	2,1	7,6	8,8
4	760	0,24	4,7	2,1	6,9	9,0
4	885	0,27	5,1	2,3	7,0	8,9
4	912	0,30	5,1	2,2	8,5	9,2
20	1153	0,18	5,0	1,9	10,3	12,5
20	1098	0,21	5,0	2,0	10,0	12,5
20	965	0,24	4,8	1,9	9,8	11,6
20	814	0,27	4,4	1,7	9,1	11,5
20	768	0,30	4,2	1,3	8,6	10,2
20	891	0,33	4,2	1,3	9,3	10,9

При температуре +4°C и расходе «Ареком-4» в количестве 0,24 % получен фибропенобетон плотностью 760 кг/м<sup>3</sup>, обладающий в возрасте 28 дней нормального твердения прочностью на сжатие 4,7 МПа и прочностью на растяжение при изгибе 2,1 МПа. При температуре +20°C и расходе «Ареком-4» в количестве 0,30% получен фибропенобетон плотностью 768 кг/м<sup>3</sup>, обладающий в возрасте 28 дней твердения прочностью на сжатие 4,2 МПа и прочностью на растяжение при изгибе 1,3 МПа. Эти результаты отражают негативное влияние повышенной растворимости ПАВ на механические свойства пенобетонов.

**Выводы.** Теоретический анализ факторов, управляющих параметрами воздухововлечения и структурной устойчивостью пенобетонных смесей в период их фазового перехода «из вязкого в твердое», позволил предположить, что растворимость поверхностно активных веществ, используемых в технологии пенобетонов может влиять на физико-механические свойства затвердевших бетонов. Результаты эксперимента показали, что охлаждение воды затворения до температуры +4<sup>0</sup>С позволяет получить структурно устойчивую пенобетонную смесь при меньшем расходе пенообразователя, по сравнению с той, которая затворена теплой водой. Продолжительность фазового перехода у холодной смеси короче, чем у теплой. Механические свойства лучше. Поэтому на практике учет температуры воды затворения может стать важным фактором повышения качества пенобетонов.

### Список литературы

1. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // Строительные материалы. 2017, № 7. С. 20-24.
2. Лотов В.А., Сударев Е.А. Влияние хлористого натрия и углекислого кальция на реологические характеристики синтетического пенообразователя в производстве пенобетона // Известия Томского политехнического университета. 2012 Т. 320 № 3. С. 50-52.

3. Доминина К.Л. Выбор управляемых параметров процесса получения пенобетонов неавтоклавного твердения определенной структуры // Приволжский вестник. 2017, № 3 (67). С. 18-21.
4. Моргун Л.В., Моргун В.Н. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей / Строительные материалы, 2003, №1. С.33-35.
5. Управление процессами технологии, структурой и свойствами бетонов/ Под ред. Е.М.Чернышева, Е.И. Шмитько: Воронеж ГАСУ, 2002. 344 с.
6. Вода в дисперсных системах / Под ред. Б.В. Дерягина. М: Химия, 1989. 288 с.
7. Веденов А.А. Физика растворов. М.: Наука, 1984. 112 с.
8. Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. Донецк: «Цифровая типография», 2011. 255 с.
9. Нияковский А.М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности//Вестник Полочкого государственного университета. Серия F, 2018. С.72-79.
10. Моргун В.Н. Теоретическое обоснование закономерностей конструирования структуры пенобетонов//М-лы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве SIB-2008». Том 1. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Книга 1. Воронежский ГАСУ, 2008. С. 333-337.
11. Русанов А.И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб: Химия, 1992. 280 с.
12. Моргун В.Н. Патент на изобретение № 2316750 «Способ определения пластической прочности пенобетонной смеси».

---

**Моргун Любовь Васильевна** – д-р техн. наук, профессор кафедры "Строительные материалы" Донского государственного строительного университета

**Нагорский Виктор Владимирович** – аспирант кафедры "Строительные материалы" Донского государственного строительного университета

**Моргун Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерно-строительных дисциплин Южного федерального университета

УДК 691

## **ФИБРОПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ – ИСТОРИЯ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

*Н.А. Белькова \*, Е.И. Иващенко, Д.Е. Курбатов*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Белькова Наталья Анатольевна,*

*E-mail: verlnata@mail.ru*

Проведен аналитический обзор научных исследований дисперсно армированных пенобетонов естественного твердения. Установлено, что при введении фибровых волокон увеличиваются прочностные характеристики, повышается трещиностойкость и долговечность пенобетонов. Выделены критические точки и переделы технологии получения фибропенобетонов для всех видов конструкций малоэтажных монолитных зданий. Определены перспективы развития фибропенобетонов и направления дальнейших исследований.

*Ключевые слова: дисперсно армированные бетоны, фибропенобетоны неавтоклавного твердения, волокна (металлические, минеральные, синтетические), прочность, величина усадки, трещиностойкость*

## **FIBROPENE CONCRETE OF NON-AUTOCLAVE HARDENING - BACKGROUND AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

*N.A. Bel'kova \*, E.I. Ivaschenko, D.E. Kurbatov*

*Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letiya Ocyabrya, 84*

*\*Corresponding author: Bel'kova Natalya Anatolyevna, E-mail: verlnata@mail.ru*

Analytical review of scientific research of dispersed reinforced foam concrete of natural hardening was carried out. It was found that when fiber fibers are introduced, strength characteristics increase, crack resistance and durability of foam concrete increases. Critical points and redistributions of the technology of producing fibropene concrete for all types of structures of low-rise monolithic buildings were identified. Prospects of development of fibrope-nobetones and directions of further research are determined.

**Keywords:** *dispersed reinforced concretes, fibropene concrete of nontoclave hardening, fibres (metal, mineral, synthetic), strength, shrinkage value, crack resistance*

Повышение эффективности строительного производства, снижение трудоемкости и стоимости технологических процессов, экономное использование энергетических и материальных ресурсов, применение новых материалов - все это задачи современного строительства.

К перспективным конструкционным материалам относятся дисперсно армированные бетоны. Значительный интерес к дисперсному армированию объясняется с одной стороны повышением прочности на растяжение, трещиностойкости и ударной вязкости бетонных материалов, с другой - получением эффективных армированных бетонных конструкций, к которым предъявляются более высокие требования.

В исследованиях по дисперсному армированию выделяют следующие направления:

- интенсификация процессов твердения бетона и улучшение его физико-механических показателей специальными затравками;
- повышение прочности композита путем его многоуровневого армирования структуры (чаще всего за счет введением армирующих волокон, которые воспринимают более высокие растягивающие напряжения по сравнению с матрицей).

Армирование бетонов выполняется металлическими, минеральными, органическими волокнами в виде рулонных материалов или в виде коротких отрезков волокон - фибр или их смесью (фибрами разной длины и разного состава).

ва), которые направлены или произвольно ориентированны в объеме бетонной матрицы.

Первый патент в области дисперсного армирования получен Д. Берадру в 1874 году, на фибробетонную конструкцию - русским инженером Некрасовым В.П. в 1909 году, на пенобетон - Байером в 1925 году [1]. Исследования по разработке фибробетонов и методов расчета конструкций из них получили широкое развитие за рубежом и в России со второй половины XX века. С начала XXI века материаловедение предлагает строительному комплексу современности фибропенобетон естественного твердения.

Широкие исследования по дисперсному армированию цементных неавтоклавных бетонов начались в 90-х годах прошлого века и продолжаются по настоящее время [2-14].

Большую работу в данной области ведут ученые Донского государственного технического университета. Исследовались:

- особенности процессов массопереноса, имеющие место при формировании структуры пенобетонных смесей; влияние полиамидной фибры на физические и механические свойства пенобетонов. Разработана методика проектирования состава фибропенобетона, технические условия и технологические регламенты на производство изделий из фибропенобетона [2];

- влияние расширяющихся добавок на процессы структурообразования и физико-механические свойства фибропенобетонов плотностью 700...800 кг/м<sup>3</sup> с компенсированной усадкой [3];

- прочностные и деформативные свойства пенобетонов плотностью 700...1100 кг/м<sup>3</sup>, армированных полиамидными волокнами, и возможность их применения для изготовления перемычек и стеновых ограждающих конструкций зданий [4];

- влияние температуры воды затворения на физико-механические свойства фибропенобетонов. Внедрена технология производства изделий из фибропенобетона D500 и D800 на цементном связующем [5];

- технологические и рецептурные факторы в регулировании структурообразования, физико-механические и конструктивные характеристики активированных малоэнергоемким переменным электрическим воздействием фибропенобетонов класса В1, плотностью D500. Разработаны рекомендации по расчетному определению физико-механических и конструктивных характеристик в зависимости от рецептурных и технологических параметров в любом возрасте и при любых параметрах активации. Внедрена заводская технология производства стеновых блоков размером 20×30×60 см и разработана технология возведения стеновых конструкций в условиях строительной площадки из активированных фибропенобетонов [6, 7].

Кудяковым А.И. и Стешенко А.Б. [8] исследовались закономерности влияния дисперсного армирования минеральными и синтетическими волокнами на прочность при сжатии, теплопроводность и усадочные деформации цементного пенобетона марки D400. Оптимальное содержание фибр в пенобетонной смеси составляет для базальтового волокна – 0,1 %, полипропиленового волокна – 0,4 % и хризотил-асбестового волокна – 2 % от массы цемента. Разработан технологический регламент приготовления стеновых материалов с пониженной усадкой и теплопроводностью для изготовления стеновых блоков и плит в заводских условиях и монолитного строительства.

Калугиным И.Г. [9] разработаны составы пенобетонов плотности D400 и D800, армированных базальтовым волокном. Содержание базальтового волокна в количестве 0,1-0,5 % от массы цемента:

- повышает прочность на 69 % и 55 % соответственно при изгибе и сжатии;
- уменьшает усадочные деформации более чем в 2 раза;
- повышает морозостойкость до 100 циклов.

Высокие показатели деформативности дают основание предположить, что данный материал возможно применять в сейсмоопасных районах.

В работе [10] изучались процессы структурообразования микроармированных пенобетонов на основе наноструктурированного вяжущего кремнеземсодержащего состава с полипропиленовой и базальтовой фибрами. Микроар-

мирование ячеистых композитов позволяет снизить усадочные деформации, интенсифицировать процесс сушки, облегчить процесс расформовки изделий.

Барановой А.А. и Бобровой А.А. [11] исследовалось влияние количества стальных, базальтовых и полипропиленовых фиброволокон на механические свойства теплоизоляционного пенобетона марки D500 на основе микрокремнезема. Экспериментально установлено оптимальное количество фиброволокон: базальтовых и стальных – 2 % от массы твердых веществ, полипропиленовых – 3 %. Наибольшие значения удельной прочности при сжатии и изгибе были получены с использованием базальтового фиброволокна.

Суворовым И.О. [12] приводятся результаты исследований влияния полиармирования полипропиленовыми, базальтовыми и хризотиловыми волокнами на усадочные деформации фибропенобетона плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Авторами статьи [13] разработаны составы пенобетонов плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> с применением отходов пиления вулканического туфа, армированных капроновыми и базальтовыми фибрами в количестве 0,2 % и 0,4 % по объему. Полиармирование эффективнее для снижения усадки пенотуфобетона по сравнению с моноармированными образцами.

С развитием нанотехнологий сформировалось новое направление в дисперсном армировании бетонов и растворов – динамическое дисперсное самоармирование цементного камня [14]. Введение в растворную смесь наномодифицированных дисперсно-упрочняющих заполнителей приводит к упрочнению цементного камня за счет роста протяженных кристаллических структур длиной в сотни микрометров в его составе.

В качестве дисперсно-упрочняющих заполнителей могут использоваться базальтовая микрофибра, углеродные микроволокна, модифицированные фуллероидами, нанотрубками, астраленами и другими разновидностями аллотропических модификаций углерода [15]. При введении в растворную смесь данные кластеры являются зародышами структурообразования, наноармирующим элементом, центрами зонирования новообразований в матрице [16].

Котляревской А.В. [17] предложены оптимальные составы пенобетонов с базальтовыми и полимерными волокнами, пластифицирующими и нанокремнеземными добавками и использование их для изготовления стеновых блоков 20×20×40 см плотностью D500 и D600 с системой параллельных воздушных прослоек толщиной 5 мм.

Гурьевой В.А. и Беловой Т.К. [18] получен композит на основе цементно-песчаной матрицы, дисперсно-армированного базальтовой микрофиброй, модифицированной (МБМ) углеродным наномодификатором – астролоном. Введение МБМ приводит:

- к повышению прочности на изгиб (перспективный конструкционный материал);
- снижению истираемости (износоустойчивый материал для применения при устройстве монолитных покрытий полов);
- снижению величины относительной деформации усадки (уменьшение негативного явления образования усадочных трещин при твердении цементных растворов).

В работе [12] исследована возможность использования в качестве армирующей добавки древесных опилок - промышленных отходов деревообрабатывающего производства. Фибропенобетон плотностью 380 кг/м<sup>3</sup>, полученный с использованием разработанного белкового пенообразователя и древесных фибр, имеет коэффициент конструктивного качества 13,2. Это позволяет классифицировать данный композит как высокоэффективный материал. Оптимальное количество древесных фибр фракции 0,135...0,63 мм составляет 5 % от массы пенообразователя.

Федоровым В.И. и Унаровым В.Н. [20] проводились физико-механические испытания пенобетонов на основе различных вяжущих (цемента, гипса, магнезиального вяжущего) с вторичной целлюлозной фиброй, извлекаемой из отходов макулатуры, для получения стенового материала класса В1...В5, плотностью D 600.

Проведенный обзор научных исследований показывает, что разработанные составы фибропенобетона естественного твердения в основном используются для производства мелкоштучных стеновых блоков. Для обеспечения эффективности и индустриализации строительства монолитных малоэтажных зданий необходимо иметь данные по составам и свойствам фибропенобетонов для конструкций перекрытия и покрытия.

Если систематизировать всю изученную информацию, то можно выделить основные параметры технологии, влияющие на характеристики монолитных фибропенобетонных конструкций. Удобнее всего для этого использовать один из инструментов качества – диаграмму Исикавы, которая позволяет выделить критические точки и переделы, влияющие на конечный результат. На рисунке представлена диаграмма Исикавы для получения заданных характеристик фибропенобетона.



Диаграмма Исикавы для монолитных конструкций из фибропенобетона

На основании анализа диаграммы Исикавы можно выделить следующие направления исследований:

- изучить влияние вида фиброволокна на свойства пенобетона;

- провести оптимизацию состава пенобетона по параметрам расхода и длины фиброволокна выбранного типа;
- определить основные характеристики полученных составов фибропенобетона: прочность (на сжатии, на растяжение, при изгибе), модуль упругости, диаграммы зависимостей между напряжениями и деформациями, усадку при высыхании, ползучесть, коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), коэффициент линейной температурной деформации.

### **Список литературы**

1. Леви Ж.П. Легкие бетоны: приготовление, свойства, применение: пер. с фр. М.: Госстройиздат, 1958. 148 с.
2. Моргун Л.В. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: Теория и методология рецептурно-технологического регулирования: автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2005. 46 с.
3. Моргун В.Н. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения с компенсированной усадкой: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2004. 23 с.
4. Богатина А.Ю. Конструкционные фибропенобетоны для зданий гражданского типа: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2005. 24 с.
5. Смирнова П.В. Температурный фактор в технологии фибропенобетона: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2010. 24 с.
6. Щербань Е.М. Регулирование структурообразования и свойств теплоизоляционных пено- и фибропенобетонов, активированных малоэнергоемким переменным электрофизическим воздействием, технологическими и рецептурными факторами: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.08, 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2014. 27 с.

7. Стельмах С.А. Влияние параметров малоэнергоемких переменных электрических полей на свойства активированных теплоизоляционных пено- и фибропенобетонов: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.08. Ростов-на-Дону, 2014. 25 с.

8. Кудряков А.И., Стешенко А.Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестник ТГСАУ. 2014. № 2. С. 127-133.

9. Калугин И.Г. Пенобетоны дисперсно-армированные базальтовым волокном: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Красноярск, 2011. 21 с.

10. Павленко Н.В., Капуста М.Н., Мирошников Е.В. Особенности армирования ячеистых бетонов неавтоклавно твердения на основе наноструктурированного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 33-36.

11. Баранова А.А., Боброва А.А. Дисперсное армирование ячеистого и мелкозернистого бетонов на основе микрокремнезема // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9, № 2. С. 694-703.

12. Суворов И.О. Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавно твердения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 32-35.

13. Фибропентуфобетоны с дисперсным полиармированием / Хежев Т.А. и [др.] // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2. Электронный ресурс]: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_27\\_Khezhev\\_N.pdf\\_7d53d750a8.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_27_Khezhev_N.pdf_7d53d750a8.pdf) (дата обращения 06.09.2021).

14. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 31-34.

15. Булярский С.В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение. Ульяновск: ООО «Стрежень», 2011. 478 с.

16. Алаторцева У.В. Конструкционные сталефибробетоны, модифицированные комплексными углеродными микро- и наноразмерными добавками: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Волгоград, 2011. 21 с.

17. Котляревская А.В. Пенофибробетоны с применением микроупрочнителей и модифицирующих добавок: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Волгоград, 2013. 21 с.

18. Гурьева В.А., Белова Т.К. Свойства цементных растворов, дисперсно армированных модифицированным микроволокном // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 13. С. 124-127.

19. Использование отходов деревообрабатывающего производства в качестве армирующей добавки при производстве фибропенобетонов / Старостина И.В. и [др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 14. С. 136-138.

20. Федоров В.И., Унаров В.Н. Стеновые материалы из фибропенобетона на различных вяжущих//Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2017. С. 68-70.

### **References**

1. Levy J.P. Light concrete. Manufacture, properties, use. Paris, Eyrolles, 1955. (Russ. ed: Levi J.P. Light concretes: preparation, properties. Moscow Gosstroyizdat, 1958. 148 p.).

2. Morgun L.V. Structure formation and properties of fibropene concrete of non-autoclave hardening: Theory and methodology of prescription-technological regulation. Autoreferat diss. dr. techn. nauk. Rostov-on-Don, 2005. 46 p. (in Russian).

3. Morgun V.N. Structure formation and properties of fibropene concrete of non-autoclave hardening with compensated shrinkage. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Rostov-on-Don, 2004. 23 p. (in Russian).

4. Bogatina A.Yu. Structural fibropene concrete for civil buildings. Autoreferat diss. techn. cand. Nauk. Rostov-on-Don, 2005. 24 p. (in Russian).

5. Smirnova P.V. Temperature factor in fibropene concrete technology. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Rostov-on-Don, 2010. 24 p. (in Russian).

6. Shcherban E.M. Regulation of structure formation and properties of heat insulation foam and fibropene concrete activated by low-energy-intensive changes in electrophysical impact, technological and recipe factors. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Rostov-on-Don, 2014. 27 p. (in Russian).

7. Stelmakh S.A. The influence of the parameters of low-energy-intensive variable electric fields on the properties of activated heat-insulating foam and fibropene-concrete. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Rostov-on-Don, 2014. 25 p. (in Russian).

8. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. [Penobeton dispersed-reinforced thermal-thermal-natural hardening]. Journal of Construction and Architecture «Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta», 2014, no 2. P. 127-133. (in Russian).

9. Kalugin I.G. Foam concrete dispersed-reinforced with basalt fiber. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Krasnoyarsk, 2011. 21 p. (in Russian).

10. Pavlenko N.V., Kapusta M.N., Miroshnikov E.V. [Features of reinforcement of cellular concretes of non-autoclave hardening based on nanostructured binder]. Journal «Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», 2013, no 1. P 33-36. (in Russian).

11. Baranova A.A., Bobrova A.A. [Disperse reinforcement of cellular and fine-grained concrete based on micro-silica]. Journal «Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate», 2019, v. 9, no. 2. P. 694-703. (in Russian).

12. Suvorov I.O. [Influence of disperse polybuilding on shrinkage deformations of fibropene concrete of non-autoclave hardening]. Journal «Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», 2015, no 1. P. 32-35. (in Russian).

13. Khezhev T.A., Beshtoev A.M., Alahmad M.Kh., Islam M.T., Kaziev K.V., Kardanov A.Yu., Kotikov M.U. [Fibrobenfo phobet with dispersed polyarmirovany]. Electronic scientific journal «Engineering Journal of Don», 2019, no 2. (in Russian).

14. Falikman V.R. [Nanomaterials and nanotechnologies in modern concrete]. Journal «Industrial and Civil Engineering», 2013, no 1. P. 31-34. (in Russian).

15. Bulyarsky S.V. Carbon nanotubes: technology, property management, application. Ulyanovsk: Strezhen LLC, 2011. 478 p. (in Russian).
16. Alatorseva U.V. Structural steelfibrobetons, modified with complex carbon micro- and nanoscale additives. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Volgograd, 2011. 21 p. (in Russian).
17. Kotlyarevskaya A.V. Penofibrobetons with the use of microdupliers and modifying additives. Autoreferat diss. techn. cand. nauk. Volgograd, 2013. 21 p. (in Russian).
18. Guryeva V.A., Belova T.C. [Properties of cement mortars dispersed with modified microfibre]. Journal «Bulletin of the Orenburg State University», 2015, no 13. P. 124-127. (in Russian).
19. Starostina I.V., Chernykh E.M., Ovcharova I.V., Starostina Yu.L., Antipova A.N. [Use of wood processing wastes as an artmining additive in the production of fibropene concrete]. Journal «Bulletin of the Kazan Technological University». 2017, v. 20, no. 14. P. 136-138. (in Russian).
20. Fedorov V.I., Unarov V.N. [Wall materials from fibropene concrete at the time of personal binders]. Trudy XIV International Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists «Prospects for the development of basic nauk». Tomsk, 2017. P. 68-70. (in Russian).

---

**Белькова Наталья Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

**Иващенко Елена Ивановна** – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной и компьютерной графики Воронежского государственного технического университета

**Курбатов Дмитрий Егорович** – инженер кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

УДК 666.972.1

## **ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА СУСПЕНЗИЙ ДИСПЕРСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ**

*В.В. Волков\*, Е.И. Гнездилова, О.Б. Кукина, А.О. Степанова*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Волков Виталий Витальевич,*

*E-mail: lgkkn@rambler.ru*

Статья посвящена исследованию влияния молекулярного состава суспензий дисперсных строительных материалов на краевой угол смачивания, как основную характеристику для оценки энергетических величин внутреннего состояния дисперсных структур. Основная проблема, с которой столкнулись авторы, – недостаток сведений о зависимостях состава и смачиваемости дисперсных материалов, а также применение современных методов для измерения геометрических параметров исследуемых суспензий. В результате эксперимента были определены геометрические параметры капли путем обмера ее фотографического изображения и рассчитаны значения краевых углов смачиваемости: их значения сопоставлены с составами образцов и теоретическими сведениями. Таким образом, авторами установлено, что увеличение краевого угла смачивания связано с наибольшим содержанием графита, а уменьшение угла обеспечивает повышенное содержание оксида кремния SiO<sub>2</sub>.

*Ключевые слова: дисперсные материалы, адгезия, краевой угол смачивания, поверхностное натяжение*

## **INFLUENCE OF THE MINERAL COMPOSITION OF SUSPENSIONS OF DISPERSED BUILDING MATERIALS ON THE WETTING EDGE ANGLE**

*V.V. Volkov\*, E.I. Gnezdilova, O.B. Kukina, A.O. Stepanova*

---

© Волков В.В., Гнездилова Е.И., Кукина О.Б., Степанова А.О., 2021

*Voronezh state technical university,*

*Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya St., 84*

*\*Corresponding author: Volkov V.V. E-mail: lgkkn@rambler.ru*

The article is devoted to the study of the influence of the molecular composition of suspensions of dispersed building materials on the wetting edge angle as the main characteristic for assessing the energy values of the internal state of dispersed structures. The main problem faced by the authors is the lack of information about the dependences of the composition and wettability of dispersed materials, as well as the use of modern methods to measure the geometric parameters of the suspensions under study. As a result of the experiment, the geometric parameters of the droplet were determined by measuring its photographic image and the values of the wettability edge angles were calculated: their values were compared with the compositions of the samples and theoretical information. Thus, the authors found that an increase in the wetting edge angle is associated with the highest graphite content, and a decrease in the angle provides an increased content of silicon oxide SiO<sub>2</sub>.

**Keywords:** *dispersed materials, adhesion, wetting edge angle, surface tension*

**Введение.** Развитие технологий конструирования новых материалов опирается на базовые принципы физики и химии. Множество ранее созданных материалов диктуют их применение в различных отраслях производства, включая строительство. Отбор для применения того или иного материала продиктован в первую очередь его физико-механическими свойствами пригодными для того или иного изделия или конструкции. Большинство строительных материалов созданы на основе дисперсных строительных материалов, затворенных водой или водными растворами, которые в силу свойств воды формируют структуры, образованные химическими и Вандер-Ваальсовыми связями. В зависимости от их соотношения и механизмов действия материалы приобретают необходимые свойства.

Одной из характеристик, регламентированной научным сообществом и нормативными документами, является величина краевого угла смачивания ме-

тодика его определения [1]. Этот угол является качественной характеристикой взаимодействия внутримолекулярных сил капли и энергии фазового перехода от капли к среде. Таким образом, исследуя величины углов смачивания и проводя корреляции между молекулярным составом суспензий дисперсных строительных материалов можно выявить механизмы и энергетические характеристики свойственные той или иной структуре. Полученные данные позволят проектировать новые материалы с заданными свойствами, а также осуществлять экспресс-анализ строительных изделий и конструкций. Поэтому смачивание и растекание жидкости по твердым поверхностям представляется для строительства одной из ключевых проблем, связанных с рациональным использованием и созданием новых строительных материалов.

Влияние и связь с энергетическими величинами, такими как краевой угол смачивания, адсорбция, предел текучести материала, поверхностное натяжение и др., а также свойствами дисперсных строительных материалов, в частности, представлены в работах [2-4]. Исследователи [5] объясняют, что ранняя стадия процесса смачивания определяется только свойствами смачивающей жидкости и сопутствующими термодинамическими условиями. Влияние состояния твердой поверхности, характеризующейся равновесным углом контакта  $\theta$ , приближается к своей величине к окончанию процесса смачивания. Исходя из этого, в различных областях промышленности важен химический состав реагирующих веществ и позволяет предсказать конечные характеристики суспензий, используемых в качестве сырья для производства различных строительных материалов. Исследование влияния состава дисперсного материала на энергетические характеристики суспензий на их основе выражающегося в изменении краевого угла смачивания и как следствие получение материалов с заданными свойствами является актуальным направлением.

### **Постановка проблемы**

К числу гидрофильных материалов относятся кальцит, кварц, слюда, большинство силикатов, галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, различные гели (желатина, селикагель) и др. У гидрофобных материалов раз-

ность полярностей по отношению к неполярным жидкостям меньше, чем по отношению к воде. В гидрофобных твердых телах преобладают гомеополярные связи. К гидрофобным материалам относятся графит, сера, сульфиды тяжелых металлов, органические вещества, многие полимеры (тефлон, полиэтилен и др.) [6].

Вязущие свойства дисперсных материалов характеризуется их смачиваемостью с качественным индикатором – краевым углом смачивания. Анализ свойств материалов свидетельствует о связи смачиваемости угольных порошков с различным содержанием углерода С, водорода Н и суммы элементов О+N+S. Величина угла возрастает примерно в 1,3 раза при увеличении содержания углерода С на 20%, когда как водород дает увеличение на 2%. Влияние кислородных групп приводит к уменьшению значения угла  $\theta$  [7]. В тоже время результаты изменение состава водных минеральных суспензий путём введения поверхностно активной добавки приводит к уменьшению поверхностного натяжения на границе раздела раствор-воздух и соответствующему увеличению поверхностного натяжения на границе раствор-твердое тело [8].

Целью данного исследования являлось изучение и сравнение адгезионных свойств суспензий дисперсных строительных материалов для выявления преимуществ их состава. Для порошковых материалов известен ряд методов измерения краевого угла смачивания [7, 9, 10]. Опираясь на метод лежащей капли, определялся краевой угол смачивания, как основная характеристика энергетических величин, сопоставляемый с объёмом каждой капли. Геометрические параметры капли определялся путем обмера ее фотографического изображения получаемого с помощью измерительного микроскопа с фотографической приставкой [1].

Для оценки влияния химического состава суспензий на основе дисперсных материалов на краевой угол смачивания была проведена серия экспериментов с применением строительных материалов перечисленных составов, таблица 1.

## Минеральный состав суспензий

№	Название пробы	Минеральный состав
1	ЗБ (Зеленый бетон)	SiO <sub>2</sub> – кварц Ca(OH) <sub>2</sub> – портландит С - графит
2	Р (Раствор)	SiO <sub>2</sub> – кварц CaCO <sub>3</sub> – кальцит CaB <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O – колеманит
3	ШБ (Шлакоблок)	CaCO <sub>3</sub> – кальцит CaB <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O – колеманит
4	К (Кирпич)	SiO <sub>2</sub> -кварц CaCO <sub>3</sub> – кальцит (Co,Ni) <sub>3</sub> S <sub>4</sub> – зигенит
5	ГЛ1 (Глина 1) (замороженная)	SiO <sub>2</sub> -кварц CaCO <sub>3</sub> –кальцит
6	ГЛ2 (Глина 2)	SiO <sub>2</sub> – кварц CaCO <sub>3</sub> – кальцит
7	КЗ (Керамзит)	SiO <sub>2</sub> – кварц С – графит FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> – герцинит
8	КБ (Керамзитобетон)	SiO <sub>2</sub> -кварц CaCO <sub>3</sub> –кальцит K <sub>0,2</sub> Na <sub>0,8</sub> Cl – галит
9	Ш (Шлак)	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> – фаялит FeO(OH) – гётит Cu <sub>2</sub> S <sub>4</sub> CuS[As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]–энаргит Ca <sub>2</sub> ZnSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> – гардистонит Ca <sub>2</sub> Mg[Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ] – окерманит
10	ПБ (Пенобетон)	SiO <sub>2</sub> – кварц CaCO <sub>3</sub> – кальцит ZnO – оксид цинка Co <sub>2</sub> CuS <sub>4</sub> – карролит

Адгезия материалов зависит от природы контактирующих фаз, свойств их поверхностей и площади контакта. Следствием адгезии является смачивание – поверхностное явление, наблюдаемое при контакте жидкости с твердым телом [10] и для обеспечения взаимодействия суспензий с поверхностью их приводят к контакту. Величины краевых углов смачивания получали на установке (рис.1) с использованием программы обработки фотографии, учитывающей ширину и высоту капли, на основании этих данных были получены их объемы.

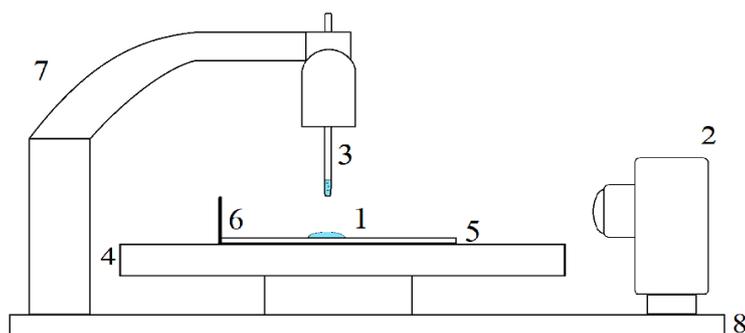


Рис. 1. Экспериментальная установка по определению смачиваемости дисперсных материалов: 1 – исследуемый образец; 2 – фотоаппарат; 3 – пипетка; 4 – подвижная платформа; 5 – предметное стекло; 6 – экранный эталон миллиметровой точности; 7 – штатив; 8 – стационарная платформа

В процессе проведения эксперимента в каждую из 10-ти мерных пробирок было насыпано по 1 грамму строительной смеси и налито по 9 мл дистиллированной воды. По прошествию времени отстаивания образцов жидкая фаза каждой пробирки была отфильтрована с помощью фильтровальной бумаги. Для обеспечения контакта капли предварительно были подготовлены и обезжирены предметные стекла, на которые впоследствии было нанесено по 5 капель каждой суспензии.

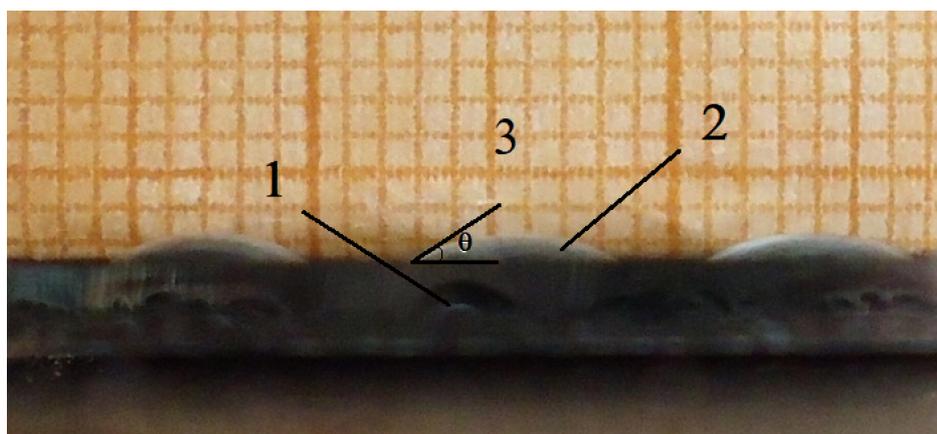


Рис. 2. Изображение капель на подложке  
1 – твердая фаза; 2 – жидкая фаза; 3 – газообразная фаза;  $\theta$  – краевой угол смачивания

Последовательная фотосъемка всех образцов показанных на рис. 2, и последующая обработка изображения позволила определить следующие параметры (табл. 2): объёмы капель, учитывая их геометрические параметры; краевые

углы смачивания и их средние значения для каждого материала, путём проведения касательной к поверхности фазы жидкость-газ и твёрдой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трёх фаз; дисперсию, т. е. средний квадрат отклонений отдельных значений от среднего арифметического значения.

Современные источники указывают [10], что свободную поверхностную энергию любого тела можно представить в виде трёх составляющих: неполярной – Лившица-Ван-дер-Ваальсовой  $\sigma^{LW}$  и двух полярных – кислотной  $\sigma^+$  и основной  $\sigma^-$ , которые выражаются через кислотно-основный параметр  $\sigma^{AB}$ . Соотношение между тремя составляющими в определяющей степени влияют на такие поверхностные  $\sigma^{LW}$  явления: смачивание, адсорбцию и адгезию. Взаимосвязь между компонентами выражается соотношением:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma^{LW} + \sigma^{AB}, \\ \sigma &= \sigma^{LW} + 2\sqrt{\sigma^+ + \sigma^-}. \end{aligned} \quad (1)$$

Таблица 2

Результат расчёта объёмов капель и краевых углов смачивания

Дата: 31.05.2021, t=25°C, p=747 мм рт. ст.

№	Рас-р	V1, мм <sup>3</sup>	V2, мм <sup>3</sup>	V3, мм <sup>3</sup>	V4, мм <sup>3</sup>	V5, мм <sup>3</sup>	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θср	D α
1	ЗБ	20,04	22,67	29,25	20,98	26,18	41,99	48,37	47,73	47,49	41,63	45,42	8,89
2	Р	10,57	18,32	24,79	22,73	16,75	31,76	32,01	30,68	30,51	30,58	31,11	0,41
3	ШБ	7,12	6,45	9,31	8,32	8,88	23,46	22,44	28,71	28,52	26,11	25,85	6,54
4	К	8,06	14,4	12,82	18,43	12,69	28,61	24,96	28,24	29,86	24,36	27,21	4,65
5	ГЛ1 J1	5,76	10,05	6,71	9,78	7,03	45	42,71	45	42,27	45	43,99	1,53
6	ГЛ2 J2	8,85	12,04	12,96	16,03	8,86	45	41,19	42,51	45	41,19	42,98	2,96
7	КЗ	7,36	2,29	4,18	5,75	4,9	19,44	25,87	27,65	22,78	25,91	24,33	8,44
8	КБ	6,36	6,32	4,99	4,36	5,68	24,36	25,14	21,99	29,05	28,18	25,74	6,65
9	Ш	12,23	10,41	12,09	12,08	12,63	41,63	45	39,29	45	42,27	42,64	4,7
10	ПБ	13,6	8,78	13,75	13,42	13,89	43,03	50,19	45	45	40,24	44,69	10,6

Измеряемые на практике краевые углы смачивания часто отличаются от термодинамически равновесных. Это связано с одной стороны с тем, что состо-

яние твердой поверхности во многом зависит от способа ее получения, степени механической подготовки, обработки различными веществами и т. д. Неопределенность в значении краевых углов наблюдается и для фиксированной пары жидкость / твердое тело. Эта неопределенность связана со способом формирования мениска: сформирован ли он при натекании или оттекании жидкости. Дело в том, что жидкость может оставаться в равновесном состоянии при изменении краевого угла в некоторых пределах: так называемый гистерезис краевого угла [11]. Справедливо замечено [12], что на гладких поверхностях гистерезис меньше, чем на шероховатых, поэтому результаты углов смачивания приняты за равновесные. Согласно представлениям Юнга [13], на однородной твердой поверхности угол  $\theta$  не зависит от объема капли жидкости, следовательно, несмотря на существенные различия объемов среди образцов, полученные значения принимаются за истинные.

Поверхностное натяжение на границе между двумя конденсированными фазами характеризует различие сил взаимодействия между молекулами в каждой из соприкасающихся фаз. Чем больше различаются по своей природе эти силы, тем больше межфазное поверхностное натяжение. Для веществ с низким поверхностным (вода, органические вещества и др.) интенсивность молекулярных взаимодействий можно охарактеризовать их полярностью.

Результаты эксперимента удобно рассматривать, полагаясь на экстремальные значения смачиваемости. Минимальное значение краевого угла соответствует образцу керамзита и обусловлено высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  в минеральном составе. Гидрофильность кремнезема доказывается экспериментально [13-14], основываясь на гидрофильных свойствах материалов, содержащих  $\text{SiO}_2$ .

Гидрофобность графита естественна, однако в зависимости от крупности кристаллизации графитовые руды относительно друг друга различно совместимы с водой: скрытокристаллический графит ( $<0,001$  мм) гидрофильный относительно крупных чешуек ( $>0,2$  мм) [15]. Современное экспериментальное исследование подтверждает [16], что метод измельчения может повлиять на шерохо-

ватость поверхности частиц графита, тем самым влияя на адсорбционную способность и смачиваемость. Таким образом, теоретически угол смачивания для образца зеленого бетона может варьироваться в некотором диапазоне.

**Заключение.** Экспериментально установленные закономерности позволили подтвердить предположение о важности качественного состава дисперсных строительных материалов, а также указать на соединения, оказывающие влияние на данный процесс. Можно утверждать о неполной смачиваемости образцов исходя из изменения значений углов смачивания в диапазоне:  $24,33^\circ < \theta < 45,42^\circ$ . Увеличение краевого угла смачивания связано с наибольшим содержанием графита, который обладает естественной высокой гидрофобностью независимо от крупности кристаллизации руды. Уменьшение угла обеспечивает повышенное содержание оксида кремния  $\text{SiO}_2$ , который является естественно гидрофильным. Необходимо отметить, что экспериментально полученные данные соответствуют теоретическим представлениям, связанным со взаимодействием дисперсных структур.

### Список литературы

1. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л. Усовершенствованный метод лежащей капли для определения поверхностного натяжения жидкостей // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. №. 2. С. 193-197.
2. Королёв Е.В., Гришина А.Н., Пустовгар А.П. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчёт и применение. // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 104-109.
3. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В. О размерной зависимости поверхностного натяжения // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 148-152.
4. Айзенштадт А.М., Дроздюк Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А., Гарамов Г.А. Активность поверхности порошков бетонного лома. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2021. Т. 13. № 2. С. 108-116.

5. Studies of the wetting kinetics of liquid-drops on solid-surfaces. ZOSEL, A Jul 1993 // Colloid and polymer science 271 (7). P. 680-687.
6. Архипов В.А., Палеев Д.Ю., Патраков Ю.Ф., Усанина А.С. Определение характеристик смачиваемости порошковых материалов. //Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 7-2. С. 20-26.
7. Леонов В.В. Материаловедение и технология композиционных материалов: курс лекций / В.В. Леонов, О.А. Артемьева, Е.Д. Кравцова; ФГОУ ВПО Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2007. 241 с.
8. Полуэктова В.А., Ломаченко В.А., Столярова З.В., Ломаченко С.М., Малиновкер В.М. Коллоидно-химические свойства водных дисперсий мела и мрамора. // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-6. С. 1205-1209.
9. Витковский И.В., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И. Метод расчёта формы тяжелой капли и её поверхностного натяжения. //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3 (293). С. 16-23.
10. Good R.J. Contact Angle, Wettability and Adhesion. / Ed. K. L. Mittal. VSP, Utrecht, TheNetherlands, 1993. P. 3-36.
11. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: Учебник-монография / В. И. Ролдугин – 2-е изд., испр. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 568 с.
12. Effect of silicananoparticles on the bulk flow properties of fine cohesive powders. Kojima, T and Elliott, JASep 20 2013 | CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE 10. P.315-328.
13. In Contact Angle, Wettability and Adhesion; Fowkes, F.; Advances in Chemistry; American Chemical Society: Washington, DC, 1964.
14. Super-hydrophilic coatings based on silicananoparticles. Polakiewicz, A; Dodiuk, H and Kenig, S. Mar 4 2014 // Journal of adhesion science and technology 28 (5). P. 466-478.
15. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. М.: Недра, 1984, 393 с.

16. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation. Zhongyun Tong, Lei Liu, Zhitao Yuan, Jiongtian Lio, Jiwei Lu, Lixia Li. Aug 1 2021 | MINERAL SENGINEERING 169.

### References

1. Director L.B., Zaichenko V.M., Maikov I.L. Improved method of a lying drop for determination of surface tension of liquids // Thermophysics of high temperatures. 2010. Vol. 48. No. 2. P. 193-197. (in Russian).

2. Korolev E.V., Grishina A.N., Pustovgar A.P. Surface tension in the structure formation of materials. Meaning, calculation and application. // Building materials. 2017. No. 1-2. P. 104-109. (in Russian).

3. Rekhviashvili S.Sh., Kishtikova E.V. On the dimensional dependence of surface tension // Journal of Technical Physics. 2011. Vol. 81. Issue 1. P. 148-152 (in Russian).

4. Aisenstadt A.M., Drozdiuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A., Gromov G.A. Surface activity of concrete scrap powders. // Nanotechnology in construction: scientific online journal. 2021. Vol. 13. No. 2. P. 108-116. (in Russian).

5. Studies of the wetting kinetics of liquid-drops on solid-surfaces. ZOSEL, A Jul 1993 | COLLOID AND POLYMER SCIENCE 271 (7). P.680-687.

6. Arkhipov V.A., Paleev D.Yu., Patrakov Yu.F., Usanina A.S. Determination of the wettability characteristics of powder materials. // News of higher educational institutions. Physics. 2012. Vol. 55. No. 7-2. P. 20-26. (in Russian).

7. Leonov V.V. Materials science and technology of composite materials: a course of lectures / V.V. Leonov, O.A. Artemyeva, E.D. Kravtsova; FGOU VPO Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2007. 241 p. (in Russian).

8. Poluektova V.A., Lomachenko V.A., Stolyarova Z.V., Lomachenko S.M., Malinovka V.M. Colloidal-chemical properties of aqueous dispersions of chalk and marble. // Fundamental research. 2014. No. 9-6. P. 1205-1209. (in Russian).

9. Vitkovsky I.V., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Yakushina S.I. Method of calculating the shape of a heavy drop and its surface tension. // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2012. No. 3 (293). P. 16-23. (in Russian).
10. Good R.J. Contact Angle, Wettability and Adhesion. / Ed. K. L. Mittal. VSP, Utrecht, The Netherlands, 1993. P. 3-36.
11. Roldugin V.I. Surface physicochemistry: Textbook-monograph / V. I. Roldugin - 2nd ed., ispr. Dolgoprudny: Publishing House «Intellect», 2011. 568 p. (in Russian).
12. Effect of silicananoparticles on the bulk flow properties of fine cohesive powders. Kojima, T and Elliott, JASep 20 2013 // Chemical engineering science. 10. P. 315-328.
13. In Contact Angle, Wettability and Adhesion; Fowkes, F.; Advances in Chemistry; American Chemical Society: Washington, DC, 1964.
14. Super-hydrophilic coatings based on silicananoparticles. Polakiewicz, A; Dodiuk, H and Kenig, S. Mar 4 2014 // Journal of adhesion science and technology 28 (5). P. 466-478.
15. Abramov A.A. Flotation methods of enrichment. Textbook for universities. M.: Nedra, 1984. 393 p. (in Russian).
16. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation. Zhongyun Tong, Lei Liu, Zhitao Yuan, Jiongtian Lio, Jiwei Lu, Lixia Li. Aug 1 2021 // Minerals engineering. 169.

---

**Волков Виталий Витальевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры строительной механики Воронежского государственного технического университета

**Гнездилова Елена Игоревна** – студент строительного факультета Воронежского государственного технического университета

**Кукина Ольга Борисовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Степанова Александра Олеговна** – инженер кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

УДК 691.3

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ БЕТОНОВ  
С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ  
ВОЕННОГО АЭРОДРОМА**

*А.А. Леденев<sup>1\*</sup>, В.Т. Перцев<sup>2</sup>, Д.Е. Барабаш<sup>1</sup>,  
А.Н. Внуков<sup>1</sup>, Н.С. Перова<sup>1</sup>, О.М. Иванова<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 54а*

*<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Леденев Андрей Александрович, E-mail: ledenoff@mail.ru*

Представлены научно-практические результаты исследований и разработок бетонных смесей и бетонов, модифицированных комплексными добавками, для строительства, ремонта и восстановления объектов инфраструктуры военных аэродромов. Показано, что перспективной областью практического применения разработанных высокопрочных бетонов, модифицированных комплексными добавками, являются огнестойкие железобетонные конструкции с повышенной несущей способностью и устойчивостью при огневом и ударно-волновом воздействии для специальных сооружений военного аэродрома. Для оперативного ремонта и восстановления сборных и монолитных цементобетонных аэродромных покрытий предложены комплексные добавки, ускоряющие твердение и повышающие прочность бетона.

**Ключевые слова:** *бетонные смеси, бетон, комплексные добавки для бетона, объекты аэродрома, конструкции зданий и сооружений*

**SCIENTIFICALLY-PRACTICAL WORKINGS OUT OF CONCRETES  
WITH THE REFINED CHARACTERISTICS FOR STRUCTURES  
OF MILITARY AERODROME**

*A.A. Ledenev<sup>1\*</sup>, V.T. Pertsev<sup>2</sup>, D.E. Barabash<sup>1</sup>,  
A.N. Vnukov<sup>1</sup>, N.S. Perova<sup>1</sup>, O.M. Ivanova<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>«Military Educational and Scientific Centre of the Air Force  
N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh),  
Russian Federation, 394064, Voronezh, ul. St. Bol'shevikov, 54a*

*<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Russian Federation,  
394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*\*Corresponding author: Andrey A. Ledenev, E-mail: ledenoff@mail.ru*

Scientifically-practical results of researches and workings out of concrete mixtures and the concretes modified by complex additives, for construction, repair and restoration of installations of an infrastructure of military aerodromes are presented. It is shown, that by perspective field of practical application of the developed high-strength concretes modified by complex additives, fire-resistant reinforced concrete constructions with the raised load-carrying capacity and a stability are at hot-fire and is shock-wave impact for special structures of military aerodrome. For operative repair and restoration precast and the monolithic cementconcretes air field coatings the complex additives speeding up a solidification and raising hardness of concrete are offered.

**Keywords:** *concrete mixtures, concrete, complex additives for concrete, installations of aerodrome, constructions of buildings and structures*

**Введение.** Для возведения зданий и сооружений гражданского, промышленного и военного назначения существует необходимость применения бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами: высокопрочных, с высокой ранней прочностью, повышенной морозостойкостью и водонепроницаемостью, обладающих стойкостью к воздействию высоких температур.

Перспективы практического применения бетонов с улучшенными свойствами для объектов военных аэродромов обусловлены актуальностью реализационных конструктивных решений зданий и сооружений, а также выполнения мероприятий по реконструкции, ремонту и восстановлению сооружений с целью их дальнейшей эксплуатации. Военный аэродром включает комплекс объектов для размещения техники и личного состава, среди которых выделяют здания и сооружения с повышенными требованиями по надежности, безопасности и устойчивости при различных воздействиях: специальные фортификационные защитные сооружения, сооружения с повышенной взрывопожарной опасностью, аэродромные покрытия и др. [1-5]. В процессе эксплуатации строительные конструкции таких объектов могут подвергаться интенсивным механическим воздействиям, а также особым комбинированным ударно-волновым или огневым воздействиям в различных сочетаниях и последовательностях, которые могут ускорить наступление разрушения конструкций [6].

Для обеспечения безопасности, постоянной исправности и готовности воздушных судов и другой специальной авиационной техники на военных аэродромах широко применяются защитные укрытия арочного типа (рис. 1). Защитные укрытия характеризуются конструкцией арочного свода, полезной площадью, степенью защищенности авиационной и специальной техники. Для возведения защитных укрытий используются большепролетные арочные железобетонные конструкции, армометаллические блочные конструкции, железобетонные арки сплошного сечения [2]. Массовое строительство железобетонных укрытий началось в 70-х годах XX века и продолжалось фактически до распада СССР [5]. На зарубежных авиабазах получили распространение арочные укрытия, собираемые из стального профиля, хотя и не способные защитить авиатехнику от последствий прямого попадания в защитное сооружение крылатой ракеты или авиабомбы, но способные обеспечить защиту от осколков и ударной волны взрыва [5]. Также существует опыт применения арочных укрытий для воздушных судов оперативно-тактической авиации, устраиваемых из металли-

ческих арок сложного волнистого профиля, на которые укладывается слой бетона толщиной до 0,5 м [1].

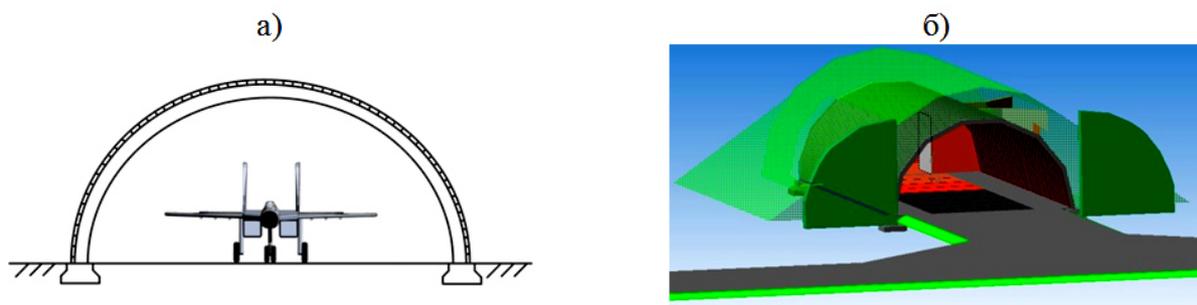


Рис. 1. Схема (а) и модель (б) арочного защитного укрытия для самолетов с применением железобетонных конструкций

С учетом развития современных средств поражения и средств их доставки в целях повышения защитных свойств объектов военного назначения при комбинированном ударно-волновом и огневом воздействии важным является применение новых конструктивных решений и материалов с улучшенными характеристиками. Повышение устойчивости строительных конструкций таких сооружений может быть обеспечено техническими решениями, предусматривающими применение различных видов бетона. Перспективным направлением реализации требований, предъявляемых к строительным конструкциям с повышенной устойчивостью при комбинированном ударно-волновом и огневом воздействии, является применение многослойных железобетонных конструкций из высокопрочного бетона [7].

Другой важной составляющей безопасности полетов авиации является обеспечение эксплуатационной пригодности аэродромных покрытий. Аэродромные покрытия воспринимают нагрузки от колес воздушных судов, воздействия природных факторов, тепловые воздействия газоздушных струй авиационных двигателей, воздействия антигололедных средств, что зачастую приводит к возникновению дефектов и их повреждению (рис. 2) [3, 4]. Также существует необходимость скоростного восстановления аэродромных покрытий, разрушенных обычными средствами поражения.

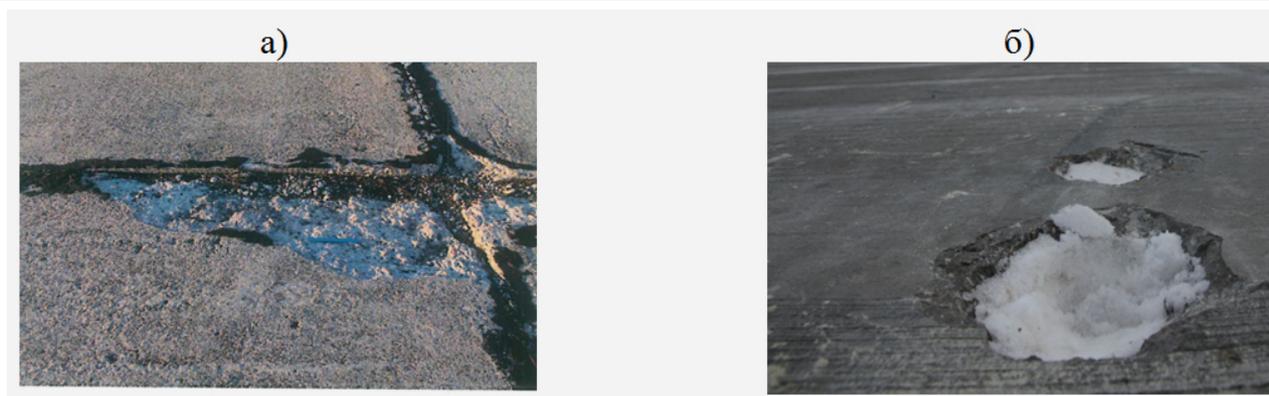


Рис. 2. Поврежденные участки аэродромных покрытий

В связи с этим, для выполнения задач по обеспечению базирования авиационных формирований, актуальным направлением является оперативный ремонт и восстановление эксплуатационной пригодности поврежденных аэродромных покрытий. В данном направлении эффективным является применение специальных ремонтных составов и смесей, обладающих ускоренным набором прочности и устойчивостью при различных природно-климатических и эксплуатационных воздействиях.

### **Методология исследований**

Получение бетонов с заданными свойствами определяется особенностями технологии их изготовления, составом и структурой [8, 9]. В связи с этим, исследование процессов формирования структуры и оценка взаимосвязи структурных характеристик и свойств на различных масштабных уровнях от микро до макроуровня, являются важными научно-практическими задачами, направленными на получение бетонов с требуемыми свойствами.

В ранее выполненных исследованиях показано, что эффективным способом получения высококачественных бетонов с улучшенными физико-механическими и специальными свойствами является разработка составов и технологии применения комплекса модифицирующих химических, минеральных, органоминеральных добавок (ОМД), наноструктурирующих компонентов и др. Применение комплексных добавок позволяет направленно модифициро-

вать структуру цементного камня и получить бетоны, превосходящие по своим свойствам существующие аналоги [8-18].

Методологический подход к разработке модифицированных бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами за счет применения комплексных ОМД предполагает реализацию следующей схемы исследований (рис. 3).

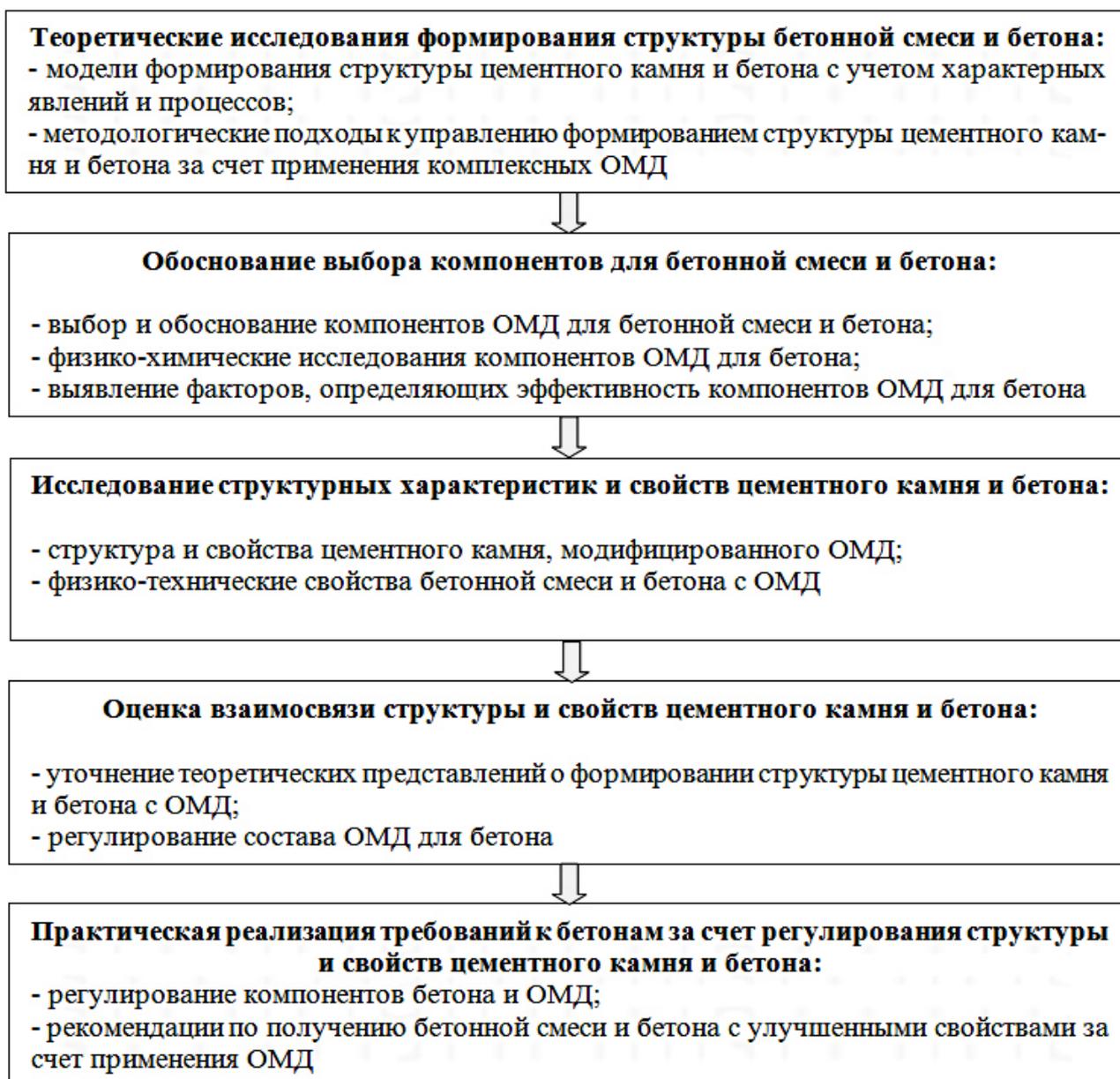


Рис. 3. Схема реализации методологического подхода, направленного на получение бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами, за счет применения комплексных ОМД

В ходе проведенных исследований были уточнены и расширены модельные представления о механизме формирования агрегированных фрактально-кластерных структур микрогетерогенной составляющей бетонных смесей и бетона, модифицированного ОМД [10, 18]. При обосновании выбора состава ОМД проанализированы классификационные группы минеральных и химических компонентов, разработана система факторов, определяющих их эффективность. Это позволило систематизировать компоненты ОМД и определить их роль в явлениях и процессах формирования структуры бетонных смесей и бетонов [10]. Важным аспектом управления процессами структурообразования и направленного регулирования свойств бетонов являлась количественная оценка взаимосвязи микроструктурных характеристик и свойств цементного камня, модифицированного ОМД. Полученные данные позволили расширить представления о влиянии комплексных ОМД на формирование структуры цементного камня и научно-обосновано подойти к получению модифицированных бетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками [10, 18].

Для модифицирования структуры цементного камня и регулирования свойств бетона разработаны комплексные ОМД на основе поверхностно-активных веществ, электролитов и тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы. Для эффективного применения комплексных ОМД определены рациональные дозировки химических компонентов, степень дисперсности и дозировка минеральных компонентов в составе ОМД, реализованы технологии их получения и введения в бетонную смесь [10, 18].

По механизму действия в цементных растворах и бетонах разработанные ОМД относятся к классу комплексных добавок полифункционального действия (ГОСТ 24211):

- обладающие пластифицирующе-водоредуцирующим действием и повышающие прочность бетона;
- ускоряющие твердение и повышающие прочность бетона.

### Результаты испытаний и их обсуждение

В ходе лабораторных испытаний установлено, что с применением ОМД, обладающих пластифицирующе-водоредуцирующим действием и повышающих прочность, получены высокопрочные бетоны со следующими характеристиками: классом по прочности В 80, морозостойкостью F 400, водонепроницаемостью W20. В работах [7, 19] показана возможность эффективного применения высокопрочного бетона, модифицированного комплексными ОМД, в качестве несущего слоя в двухслойных огнестойких железобетонных конструкциях (рис. 4). Разработан способ формования железобетонных конструкций, включающий послойную укладку бетонной смеси несущего слоя из высокопрочного бетона и его уплотнение, укладку слоя бетонной смеси из термостойкого огнезащитного покрытия и его уплотнение. Реализация предлагаемого способа формования с применением разработанных бетонов, позволяет получить железобетонные изделия и конструкции, обладающие повышенной несущей способностью и устойчивостью при огневом и ударно-волновом воздействии [7, 19].

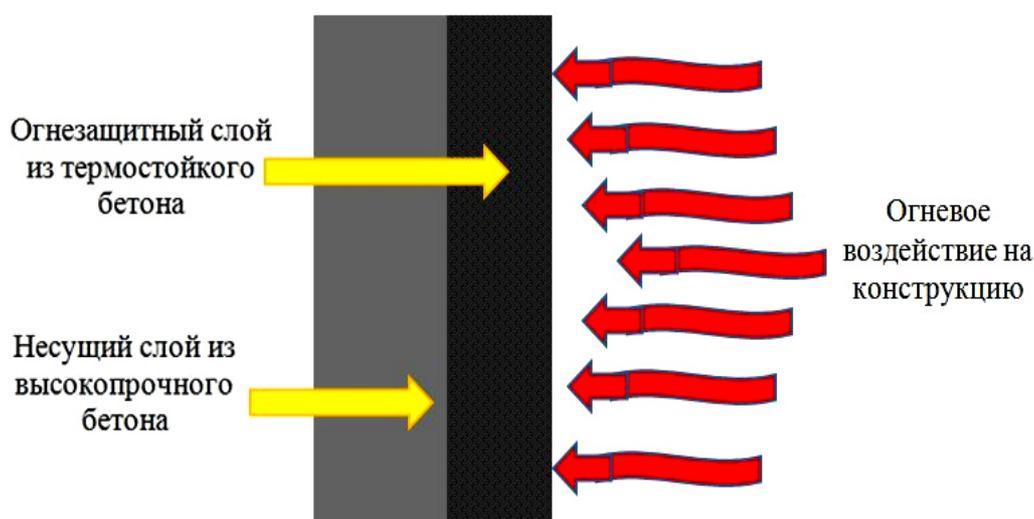


Рис. 4. Схема двухслойной огнестойкой железобетонной конструкции с применением высокопрочного бетона, модифицированного комплексной ОМД [7, 19]

Расчетно-аналитическим методом установлено, что применение высокопрочного бетона в составе двухслойной конструкции позволяет повысить ее огнестойкость более чем в 3 раза до 200 минут. Таким образом, применение раз-

работанных составов и технологии модифицированных бетонов в двухслойных огнестойких железобетонных конструкциях позволит повысить долговечность, безопасность и устойчивость зданий и сооружений военного назначения при огневом и ударно-волновом воздействии.

Испытания разработанных ОМД, ускоряющих твердение и повышающих прочность бетона, первоначально проводили на цементном камне. Установлено, что применение данных модификаторов позволяет существенно ускорить процессы твердения. В возрасте 1 суток прочность цементного камня составила 64 МПа, что в 4 раза больше прочности цементного камня без добавок. В возрасте 28 суток твердения прочность модифицированного цементного камня составила 90 МПа. Высокая эффективность разработанных модификаторов обеспечивается за счет взаимного усиления эффективности действия тонкодисперсного минерального компонента и электролита на основе неорганических солей, совместное использование которых способствует увеличению растворимости силикатных составляющих портландцемента, что приводит к ускорению процессов гидратации, сокращению сроков схватывания цементного теста и ускоренному набору прочности цементного камня [20].

С применением разработанных комплексных ОМД, ускоряющих твердение и повышающих прочность бетона, а также фракционированных заполнителей предложены составы и технология сухой бетонной смеси для оперативного ремонта и восстановления цементобетонных сборных и монолитных покрытий летного поля аэродрома: взлетно-посадочных полос; мест стоянок воздушных судов; соединительных рулежных дорожек; магистральных рулежных дорожек. Предлагаемые смеси могут быть эффективно использованы как для оперативного ремонта трещин, выбоин, так и для глубоких разрушений (более 30 см).

**Заключение.** Таким образом, представленные результаты научно-практических разработок бетонов с улучшенными характеристиками, модифицированных комплексными добавками, показали возможность их эффективного применения для строительства, ремонта и восстановления зданий и сооружений военного назначения. Применение бетонов с улучшенными характеристиками

позволит обеспечить надежность, долговечность и устойчивость строительных конструкций объектов военного назначения при различных эксплуатационных воздействиях.

### **Список литературы**

1. Левыкин В.И. Фортификация: прошлое и современность. М.: Воениздат, 1987. 159 с.
2. Попов А.Н., Фофонов Ю.М., Гуторова А.С., Андреев В.В. Технология строительства арочных защитных укрытий для самолетов. Воронеж: ВВАИИ, 2004. 42 с.
3. Кульчицкий В.А., Макагонов В.А., Васильев Н.Б., Чеков А.Н., Романков Н.И. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. М.: Физико-математическая литература, 2002. 528 с.
4. Виноградов А.П. Надежность и сертификация цементобетонных покрытий аэродромов. М.: Транспорт, 1994. 125 с.
5. «Военная приёмка»: «База Хмеймим. Часть 2»: Где укрытия для авиатехники? [Электронный ресурс] <https://bmpd.livejournal.com/2666767.html>.
6. Приступок Д.Н. Огнестойкость зданий из железобетонных конструкций при комбинированных особых воздействиях с участием пожара: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 21 с.
7. Леденев А.А., Перова Н.С., Внуков А.Н., Перцев В.Т. Применение материалов со специальными свойствами для строительства, реконструкции и восстановления объектов инфраструктуры военных аэродромов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 107-114.
8. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2007. 528 с.

10. Перцев В. Т., Леденев А. А., Рудаков О. Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. № 20 (3). С. 432-442.
11. Barat D. Performance of cement concrete with mineral admixtures // *Advance in Cem. Res.* 2001. 13. № 4. P. 139-155.
12. Chuah S., Pan Z., Sanjaan J. G., Wang C. M., Duan W. H. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from grapheme oxide // *Construction and Building materials.* 2014. 73. P. 113-124.
13. Duanle Li, Dongmin Wang, Caifu Ren, Yafeng Rui. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash // *Construction and Building Materials.* 2018. 188. P. 1007-1013.
14. Shuai Zhang, Wei-Guo Qiao, Peng-Cheng Chen, Kai Xi. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer // *Construction and Building Materials.* 2019. 212. P. 10-18.
15. Mardani-Aghabaglou Ali, Tuyan Murat, Yilmaz Gokhan, Arioz Omer, Ramyar Kambiz. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete // *Construction and Building Materials.* 2013. 47. P. 1020-1025.
16. Касторных Л.И., Рауткин А.В., Раев А.С. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 1. Реологические характеристики цементных композиций // *Строительные материалы.* 2017. № 7. С. 34-38.
17. Касторных Л. И., Деточенко И. А. Аринина Е. С. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 2. Реологические характеристики бетонных смесей и прочность самоуплотняющихся бетонов // *Строительные материалы.* 2017. № 11. С. 22-27.
18. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей: монография. Воронеж. ВГАСУ, 2012. 136 с.

19. Перцев В.Т., Загоруйко Т.В., Леденев А.А. Бетон повышенной термостойкости для огнестойких железобетонных изделий: монография. Воронеж. ВГТУ, 2017. 102 с.

20. Леденев А.А., Перцев В.Т., Джафар Рамадан Аль Судани. Комплексные модификаторы полифункционального действия для придания бетонам специальных свойств // «Научный вестник ВГАСУ». Серия «Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения». 2014. №1(8). С. 56-63.

### References

1. Levykin V.I. Fortifikatsiia: proshloe i sovremennost' [Fortification: past and present]. M.: Voenizdat, 1987. 159 p.

2. Popov A.N., Fofonov Yu.M., Gutorov A.S., Andreev V.V. Tekhnologiia stroitel'stva arochnykh zashchitnykh ukrytii dlia samoletov [Technology of construction of arched protective shelters for aircraft]. Voronezh: VVAII, 2004. 42 p.

3. Kul'chitskii V.A., Makagonov V.A., Vasil'ev N.B., Chekov A.B., Romankov N.I. Aerodromnye pokrytiia. Sovremennyi vzgliad [Airfield of a covering. A modern sight]. M.: Fiziko-matematicheskaiia literatura, 2002. 528 p.

4. Vinogradov A.P. Nadezhnost' i sertifikatsiia tsemento-betonnykh pokrytii aerodromov [Reliability and certification of cement concrete pavements of airfields]. M.: Transport, 1994. 125 p.

5. «Military acceptance»: «Base Khmeimim. A part 2»: Where shelters for aircraft technicians? [Electronic resource] <https://bmpd.livejournal.com/2666767.html>

6. Pristupiuk D.N. Ognestoikost' zdanii iz zhelezobetonnykh konstruktsii pri kombinirovannykh osobykh vozdeistviiakh s uchastiem pozhara: avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk. Fire resistance of buildings from ferro-concrete constructions at the combined special influences with fire participation: abstract of the dissertation... cand. tech. sci]. Moscow, 2013. 21 p.

7. Ledenev A.A., Perova N.S., Vnukov A.N., Pertsev V.T. Application of materials with special properties for construction, reconstruction and restoration of military airfields infrastructure facilities // *Aerospace forces. Theory and practice*. 2020. No 13. P. 107-114.
8. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concretes. Moscow: ASV, 2006. 368 p.
9. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete. Moscow: ASV, 2007. 528 p.
10. Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. Physical and chemical approaches to the development of effective organomineral additives for concrete // *Condensed Matter and Interphases*. 2018. No 20(3). P. 432-442.
11. Bapat D. Performance of cement concrete with mineral admixtures // *Advance in Cem. Res*. 2001. 13. No 4. P. 139-155.
12. Chuah S., Pan Z., Sanjaan J. G., Wang C. M., Duan W. H. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from grapheme oxide // *Construction and Building materials*. 2014. 73. P. 113-124.
13. Duanle Li, Dongmin Wang, Caifu Ren, Yafeng Rui. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash // *Construction and Building Materials*. 2018. 188. P. 1007-1013.
14. Shuai Zhang, Wei-Guo Qiao, Peng-Cheng Chen, Kai Xi. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer // *Construction and Building Materials*. 2019. 212. P. 10-18.
15. Mardani-Aghabaglou Ali, Tuyan Murat, Yilmaz Gokhan, Arioiz Omer, Ramyar Kambiz. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. 47. P. 1020-1025.
16. Kastornykh L.I., Rautkin A.V., Raev A.S. Effect of Water-Retaining Admixtures on Some Properties of Self-Compacting Concretes. Part 1. Rheological Characteristics of Cement Compositions // *Construction Materials*. 2017. No 7. P. 34-38.

17. Kastornykh L.I., Detochenko I.A., Arinina E.S. Effect of Water-Retaining Admixtures on Some Properties of Self-Compacting Concretes. Part 2. Rheological Characteristics of Concrete Mixes and Strength of Self-Compacting Concretes // Construction Materials. 2017. No 11. P. 22-27.

18. Pertsev V.T., Ledenev A.A. Development of effective complex organomineral additives for regulation of rheological properties of concrete mixtures: monograph. Voronezh: VGASU, 2012. 136 p.

19. Pertsev V.T., Zagorujko T.V., Ledenev A.A. Concrete of the raised thermal stability for fire-resistant ferro-concrete products: monograph. Voronezh. VGTU, 2017. 102 p.

20. Ledenev A.A., Pertsev V.T., Dzhafar Ramadan Al' Sudani. Complex modifiers of the multifunctional actions for giving to concrete of special properties // «Nauchnyi vestnik VGASU». Seriya «Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniia». 2014. № 1 (8). P. 56-63.

---

**Леденев Андрей Александрович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Перцев Виктор Тихонович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

**Барабаш Дмитрий Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры изыскания и проектирования аэродромов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Внуков Алексей Николаевич** – канд. техн. наук, начальник отдела научно-исследовательского Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Перова Надежда Сергеевна** – канд. техн. наук, преподаватель кафедры изыскания и проектирования аэродромов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Иванова Ольга Михайловна** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и химии Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

УДК 69.04:691.32

## **ИЗГИБНЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, А.В. Звягинцева\**

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Звягинцева Алла Витальевна,*

*E-mail: zvyginsevaav@mail.ru*

В работе представлен анализ видов дисперсного армирования. На его основе для эксперимента приняты металлические фибры. Показано, что армирование бетона металлическими фибрами позволяет существенно повысить трещиностойкость для изготавливаемых из фибробетона конструкций по сравнению с аналогичными железобетонными конструкциями. При этом блокировка развития трещин и блокирование возможности образования магистральных трещин достигается в конструкциях из фибробетона за счет более равномерного распределения возникающих в бетоне усилий. Приведены результаты эксперимента балок с дисперсным армированием на действие изгибающей нагрузки. Выполнен расчет растянутого и изгибаемого элемента с дисперсным и с комбинированным армированиями. Расчет показал, что использование в конструкциях комбинированного армирования позволяет повысить общую несущую способность таких конструкций. Выполнено сравнение результатов расчета и эксперимента, которое показало хорошую сходимость.

*Ключевые слова: дисперсное армирование, фибробетон, металлические фибры, конструкции, изгиб, расчет прочности, эксперимент*

## **FLEXURAL STRENGTH CHARACTERISTICS OF FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

*Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*\*Corresponding author: Zvyagintseva Alla V., E-mail: zvygincevaav@mail.ru*

The paper presents an analysis of the types of dispersed reinforcement. On its basis, metal fibers were adopted for the experiment. It is shown that concrete reinforcement with metal fibers can significantly increase crack resistance for structures made of fiber-reinforced concrete in comparison with similar reinforced concrete structures. In this case, blocking the development of cracks and blocking the possibility of the formation of main cracks is achieved in structures made of fiber-reinforced concrete due to a more even distribution of the forces arising in the concrete. The results of the experiment of beams with dispersed reinforcement on the action of a bending load are presented. The calculation of a stretched and bending element with dispersed and combined reinforcement has been performed. The calculation showed that the use of combined reinforcement in structures can increase the overall bearing capacity of such structures. Comparison of the calculation and experimental results has been carried out, which has shown good convergence.

***Keywords:** dispersed reinforcement, fiber concrete, metal fibers, structures, bending, strength calculation, experiment*

**Введение.** Современное строительство открывает нам широкие возможности и не стоит на месте. Оно неразрывно связано с решением задач для повышения эффективности строительства, таких как: снижение трудоемкости; снижение материальных затрат; применение прогрессивных материалов.

В настоящее время, бетон занимает лидирующие позиции среди других строительных материалов. Но наряду с этим, у бетонов имеется существенный недостаток - он плохо воспринимает растягивающие напряжения, поэтому возникает необходимость в армировании, что существенно продляет срок эксплуатации конструкции.

Стержневое армирование, не так сильно влияет на трещиностойкость бетона. В мире все большую популярность набирает дисперсное армирование бе-

тона, при котором в бетонной смеси равномерно распределен армирующий компонент - стальные фибры. Данный вид армирования открывает широкие перспективы в конструктивном и технологическом отношении. Дисперсное армирование широко используется во многих странах, это объясняется тем, что специалисты преследуют цель повысить прочность на растяжение, трещиностойкость [1, 2].

Целью работы является расчет растянутых и изгибаемых элементов с дисперсным и комбинированным армированием и сравнение полученных результатов с данными экспериментов.

Анализ видов дисперсного армирования. Благодаря дисперсному армированию бетон обретает высокие физико-механические характеристики, что подтверждают лабораторные исследования и эксперименты. На качество конструкции влияет вид армирующего материала, не все волокна отвечают заданным требованиям. В настоящее время различают три основных армирующих волокна: волокна (фибры) из стальной тонкой проволоки; волокна стеклянные; волокна на основе полипропилена [7-12].

Модуль упругости стальной фибровой арматуры в 6 раз больше, чем модуль упругости бетона. Модуль упругости стекловолоконистых материалов в 3 раза больше модуля упругости бетона. Модуль упругости волокна на основе полипропилена составляет четверть упругости бетона. Таким образом, делаем вывод, что стальные волокна являются наиболее перспективными для армирования бетона. Примеры стальных фибр представлены на рис. 1.

Для получения однородной армированной бетонной смеси необходимо обращать внимание на относительную длину фибр. Применение коротких фибр невыгодно, потому что их длины не хватает для заанкеривания в бетон. Для лучшего сцепления фибры с бетоном следует использовать арматуру с рельефной поверхностью, гнутые фибры, фибры с различного рода анкерами и т.п. Для армирования бетонов широко используют проволоки фибры, которые нарезают длиной 30-160 мм, их диаметр составляет 0,3-1,6 мм.

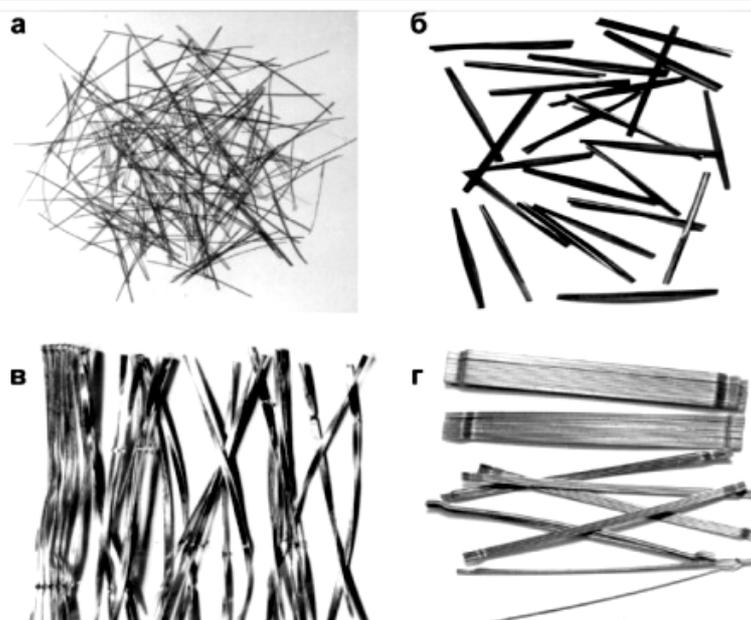


Рис. 1. Вид стальных фибр:  
а - из проволоки; б - из сляба; в - из листа; г - «Драмикс» Бельгия

Эффективно применять фибры с отгибами на концах и рельефным очертанием, это обеспечит более прочное сцепление бетона с фибрами. При успешном использовании стальной проволоки увеличится объем ее производства (на данный момент объем составляет меньшую долю от объема производства арматурной стали, порядка 3%), а это тем самым послужит уменьшением объема традиционной арматуры.

Фибры из стального листа имеют неоднозначный профиль, торцы развернуты друг от друга, что обеспечивает эффективное сцепление с бетоном. Прочность на растяжение данных фибр составляет 380-650 МПа.

Бетоны, армированные стальными фибрами, имеют следующие параметры, от которых зависит равномерное распределение волокон в бетоне: отношения длины волокон к диаметру; объемного содержания волокон; размера частиц заполнителя. Фибробетон может применяться в различных областях [1, 3].

Традиционный метод перемешивания бетонной смеси не является гарантией равномерного распределения фибр в объеме бетонной смеси, результатом выступают образования в виде комков в смеси, из-за которых препятствуют об-

разованию необходимой однородности. Эта актуальная проблема в технологическом процессе, которая возникает независимо от вида вяжущего или волокон.

В ходе многочисленных исследований и экспериментов, установлено, что для равномерного распределения волокон в смеси необходимо контролировать длину и диаметр волокон, их количества в объеме матрицы. Большую роль играет длина используемых волокон. Чем больше длина волокон - тем больше анкерующая способность в бетоне, но вместе с этим снижается качество перемешивания волокон с бетонной смесью в бетоносмесителе. Многие исследователи считают оптимальное отношение:  $l_f/d_f=100$ , где  $l_f$  - длина фибр;  $d_f$  - диаметр фибр. Однако в последнее время это значение снижается до 50-80.

На качество фиброармированной смеси огромное значение оказывает равномерное распределение фибр в бетоне. Не менее важно следить, чтобы фибровая арматура поступала в бетоносмеситель постепенно во время перемешивания.

Следует обратить внимание, что по мере увеличения волокон в объеме бетона- понижается удобоукладываемость. Отметим также, что на удобоукладываемость бетона влияет длина и диаметр волокон - если длину волокон увеличить, то удобоукладываемость ухудшится, так же и при уменьшении диаметра волокон при прочих равных условиях. [5-10].

Оптимальное содержание фибр в бетоне составляет 1-1,5 % (80-120 кг фибр на 1 м<sup>3</sup>). При более высоком содержании растет трудоемкость изготовления конструкции и понижается конкурентоспособность.

**Расчет сталефибробетонных конструкций.** Расчет проводился в соответствии с [1, 2]. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований прочности сталифибробетонных (СФБ) образцов при статической нагрузке. Испытаниям подвергались балки с размерами 10×10×1650 мм, армированные с помощью стальных фибр с диаметром 0,8мм и стержневым армированием  $d=6$  мм, с коэффициентом стержневого армирования  $\mu_f=0,00471$ . Расчетное сопротивление фибр  $R_f = 950$  МПа; модуль упругости фибр  $E_f = 1,9 \cdot 10^5$  МПа. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

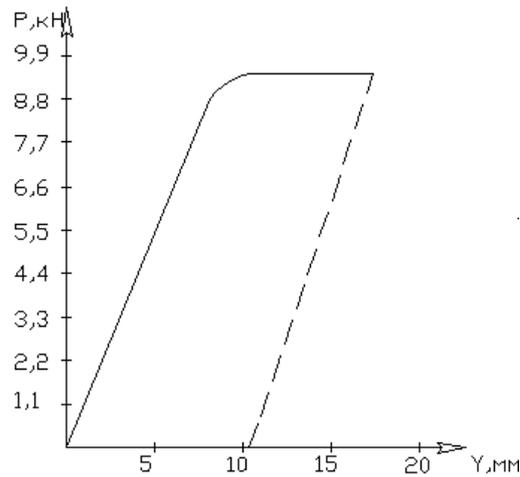


Рис. 2. График зависимости P-Y.

Для проведения эксперимента и расчетов была использована расчетная схема приведенная на рис. 3.

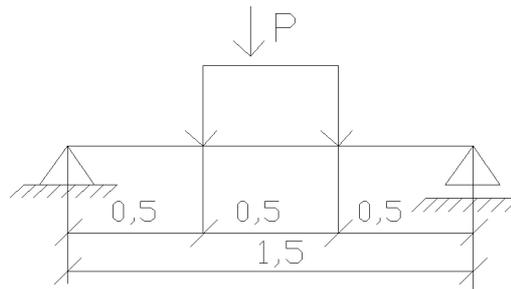


Рис. 3. Схема нагружения балки расположенной на двух опорах

Определяем расчетное сопротивление при растяжении:

$$R_{fbl} = m_1 \left[ k_1 k_{or}^2 \mu_{f\gamma} R_f \left( 1 - \frac{l_{f,an}}{l_f} \right) + 0.1 R_b \left( 0.8 - \sqrt{2 \mu_{f\gamma} - 0.005} \right) \right] =$$

$$= 1.1 \left[ 0.5 \cdot 0.53^2 \cdot 0.00471 \cdot 600 \left( 1 - \frac{0.4}{100} \right) + 0.1 R_b \left( 0.8 - \sqrt{2 \cdot 0.00471 - 0.005} \right) \right] = 0.38 \text{ МПа},$$

где  $m_1 = 1.1$ ;  $k_{or} = 0.53$ ;  $\mu_{f\gamma} = 0.00471$ ;  $R_f = 600$ .

Расчетное сопротивление при сжатии:

$$R_{fb} = R_b + (K_n^2 \varphi_a \mu_f R_f), \quad (1)$$

где  $K_n = 0.481$  - коэффициент, с помощью которого учитывается работа фибр в расчетном сечении;  $\varphi_a$  - коэффициент эффективности косвенного армирования фибрами.

$$\varphi_a = \frac{5+L}{1+4,5L} = \frac{5+0,04}{1+4,5 \cdot 0,04} = \frac{5,4}{1,18} = 4,2;$$

$$L = \frac{K_n^2 \mu_{fn} R_f}{R_b} = \frac{0,23 \cdot 0,00471 \cdot 600}{14,5} = 0,04;$$

$$R_{fb} = 14,5 + (0,23 \cdot 4,2 \cdot 0,00471 \cdot 600) = 17,2 \text{ МПа.}$$

Определяем значения коэффициентов приведенного армирования:

-в сжатой зоне:  $\mu'_{fa} = \mu_{fy} K_n^2 = 0,00471 \cdot 0,23 = 0,00108;$

-в растянутой зоне:  $\mu_{fa} = \mu_{fy} K_{or}^2 = 0,00471 \cdot 0,28 = 0,00132.$

Определяем значение граничной относительной высоты сжатой зоны:

$$\varepsilon R = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = 0,73,$$

где  $\omega$  – характеристика сжатой зоны СФБ;  $\omega = \varphi - 0,008R_b = 0,85 - 0,008 \cdot 14,5 = 0,734;$   
 $\varphi = 0,85; \sigma_{sR} = 0.$

Для расчета изгибаемых элементов применяем условие  $M \leq M_{ult}$ , где  $M_{ult}$  – максимальный изгибающий момент в расчетном сечении [2].

Для фибрового армирования принимают  $M_{ult} = R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot 0,5 \cdot h.$

Определяем значение высоты сжатой зоны:

$$x = \frac{R_{fbt} h}{R_{fb} + R_{fbt}} = \frac{0,38 \cdot 0,1}{0,38 + 17,2} = 0,002; \quad M_{ult} = 17,2 \cdot 0,1 \cdot 0,002 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 18,56 \text{ кгс м.}$$

При комбинированном армировании использовалась формула:

$$M_{ult} = R_{fb}bx \left( b - \frac{x}{2} - a \right) + R_{sc}A'_s(h - a' - a) - R_{fbt}b(h - x) \left( \frac{h-x}{2} - a \right).$$

На рис. 4 изображена эпюра напряжений и схема приложения нагрузки в расчетном сечении изгибаемой фибробетонной балки, при расчете по прочности (при фибровом армировании), а на рисунке 5 – эпюра напряжений и схема приложения нагрузки в расчетном сечении изгибаемой фибробетонной балки, при расчете по прочности (при комбинированном армировании) [2].

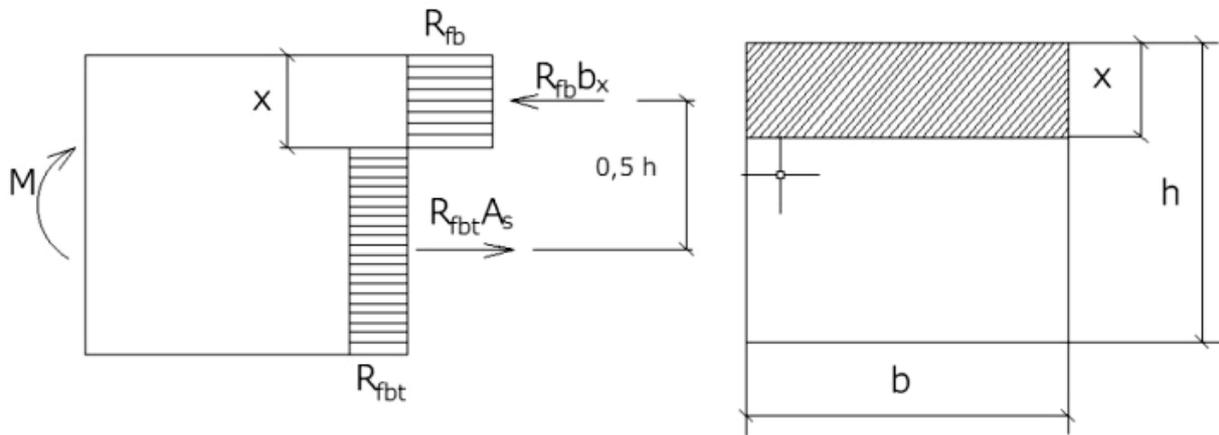


Рис. 4. Эпюра напряжений и схема приложения нагрузки в расчетном сечении изгибаемой фибробетонной балки, при расчете по прочности (при фибровом армировании)

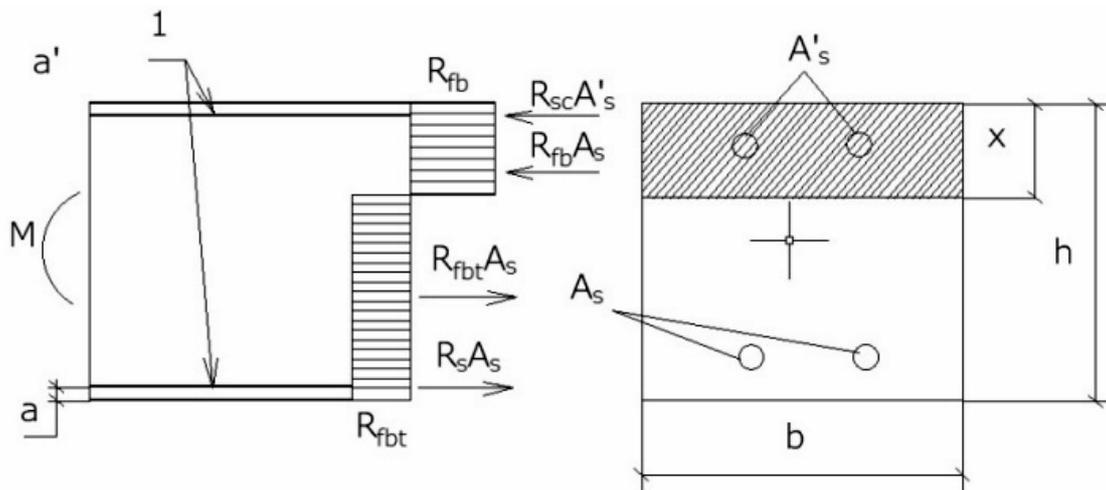


Рис. 5. Эпюра напряжений и схема приложения нагрузки в расчетном сечении изгибаемой фибробетонной балки, при расчете по прочности (при комбинированном армировании) [2]

Высоту сжатой зоны  $x$  определяют из формулы

$$R_{sc}A_s + R_{fb}bx = R_{fbt}b(h - x) + R_sA_s; \quad x=0,002;$$

$$M_{ult} = 17,2 \cdot 10 \cdot 0,002 \left( 10 - \frac{0,002}{2} - 1,2 \right) + 218 \cdot 0,002(10 - 1,2 - 1,2) -$$

$$- 0,38 \cdot 10(10 - 0,002) \left( \frac{10 - 0,002}{2} - 1,2 \right) = 49,4 \text{ кгс м.}$$

Расчет элементов из фибробетона с учетом раскрытия трещин состоит из расчетов по факту образованию трещин и по их раскрытию.

Максимальный момент образования трещин  $M_{max} = 28,5 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ .

Момент трещинообразования  $M_{crc} = W_{pt} R_{bt,ser}$ , где  $W_{pt}$  – значение момента сопротивления в крайнем растянутом волокне сечения

$$W_{pt} = \frac{2(I_{bc} + \alpha_f I_{fc1} + \alpha_f I_{fl})}{h - x} + S_{bt}; \quad W_{pt} = 0,013 \text{ м}^3; \quad M_{crc} = 0,013 \cdot 1,55 = 20,9 \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

Так как  $M=28,5 \text{ кгс} \cdot \text{м} > M_{crc} = 20,9 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ , то условие соблюдается.

Расчет СФБ фрагментов конструкций выполняем по условию нормирования прогибов:

$$f \leq f_{ult}; \quad f = \int_0^l \overline{M}_x \left( \frac{1}{r} \right)_{tot,x} dx; \quad \left( \frac{1}{r} \right)_{tot,x} = \left( \frac{1}{r} \right)_1 + \left( \frac{1}{r} \right)_2 = 0.84 + 1.34 = 2.18,$$

где  $f$  – величина прогиба СФБ фрагмента конструкции от внешней нагрузки;

$f_{ult}$  – максимальный прогиб;  $\overline{M}_x$  – от воздействия единичной силы величина изгибающего момента в расчетном сечении  $x$ ;

$\left( \frac{1}{r} \right)_{tot,x}$  – в расчетном сечении  $x$  величина максимальной кривизны элемента, возникающая от воздействия внешней нагрузки;

$\left( \frac{1}{r} \right)_1$  и  $\left( \frac{1}{r} \right)_2$  – кривизна от постоянных и кратковременных и дли-

тельных нагрузок;  $f = 6,54$  мм = 0,65 см;  $f_{ult}$  принимаем не больше 1/150 длины пролета;

$$f_{ult} = 1\text{см} > f = 0,65\text{ см.}$$

При выполнении работы были использованы материалы исследований [4-28].

**Заключение.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при сравнении уровней трещиностойкости железобетонных конструкций и конструкций из фибробетона, преимущество по указанному параметру принадлежит последним. Такое преимущество достигается за счет особенностей в структуре фибробетона, так как дисперсное армирование способствует более равномерному распределению усилий внутри массива конструкции. Таким образом, создается менее благоприятная среда для развития трещин в фибробетоне, за счет чего развитие магистральных трещин тоже приостанавливается [27 -28].

Установлено, что при использовании комбинированного армирования повышается общая несущая способность конструкции. Выполнен расчет изгибаемых элементов с дисперсным и комбинированном армированием. Сравнение полученных результатов с данными экспериментов показало хорошую сходимость.

### Список литературы

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф.Н. Рабинович // М.: Издательство АСВ, 2011. 642с.
2. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции.
3. Nikolenko S.D. Behaviour of concrete with a disperse reinforcement under dynamic loads / S.D. Nikolenko, E.A. Sushko, S.A. Sazonova, A.A. Odnolko, V.Ya. Manokhin // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 7 (75). С. 3-14.

4. Игнатюк А.С. Процесс тепловизионного обследования ограждающих конструкций здания / А.С. Игнатюк, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2019. Т. 12. № 4. С. 66-72.

5. Верещагин, А.Ю. Программа геотехнического мониторинга объектов, входящих в зону влияния строительства / А.Ю. Верещагин, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2019. Т. 12. № 4. С. 4-9.

6. Андреев Е.С. Моделирование дефектов при ультразвуковом контроле сварных соединений / Е.С. Андреев, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 1. С. 4-9.

7. Пантелеев А.И. Процесс обследования несущих конструкций технологических эстакад / А.И. Пантелеев, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 1. С. 61-68.

8. Галаева С.С. Исследование процесса оценки состояния деревянных конструкций / С.С. Галаева, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2019. Т. 12. № 4. С. 10-16.

9. Старцев В.Н. Анализ прочности монолитного перекрытия здания и контроль проектной документации / В.Н. Старцев, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 2. С. 57-63.

10. Старцев В.Н. Моделирование термонапряженного состояния фундамента и разработка мероприятий по улучшению эксплуатационных свойств бетона / В.Н. Старцев, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 2. С. 64-71.

11. Сазонова С.А. Моделирование технологических приемов по улучшению условий труда на строительном объекте / С.А. Сазонова, С.Д. Николенко, А.А. Осипов // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 4. С. 71-83.

12. Сазонова С.А. Анализ средств индивидуальной защиты и разработка мероприятий для улучшения условий труда на складе / С.А. Сазонова, С.Д. Николенко, Н.В. Акамсина // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 4. С. 64-71.

13. Николенко С.Д. Моделирование процесса износа кирпичных зданий / С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, Н.В. Акамсина // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14. № 1. С. 44-50.

14. Кораблин С.Н. Моделирование температурных напряжений в фундаментных плитах здания / С.Н. Кораблин, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 1. С. 54-60.

15. Проскурин Д.К. Сходимость вычислительного процесса при реализации вариационного метода решения краевой задачи гидродинамики / Д.К. Проскурин, Д.В. Сысоев, С.А.Сазонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 14-19.

16. Меркулов А.С. Моделирование процессов, влияющих на качество бетонных покрытий дорог / А.С. Меркулов, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14. № 1. С. 38-44.

17. Рогов Н.Ю. Моделирование процесса обследования железобетонных опор технологических эстакад / Н.Ю. Рогов, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14. № 1. С. 68-73.

18. Сазонова С.А. Моделирование опасных внутренних усилий при расчете смешанным методом статически неопределимых рам со стержнями заданной жесткости / С.А. Сазонова, В.Ф. Асмнин, А.В. Звягинцева // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14. № 2. С. 44-54.

19. Сазонова С.А. Расчет смешанным методом статически неопределимых рам с элементами повышенной жесткости и численная проверка результатов расчетов с помощью метода конечных элементов / С.А. Сазонова, В.Ф. Асмнин, А.В. Звягинцева // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14. № 2. С. 54-66.

20. Сазонова С.А. Итоги разработок математических моделей анализа потокораспределения для систем теплоснабжения / С.А. Сазонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 5. С. 68-71.

21. Головина Е.И. Интегральная балльная оценка тяжести труда операторов смесителей асфальтобетонных заводов в условиях высокой запыленности рабочей зоны / Е.И. Головина, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, М.В. Манохин, В.Я. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 1 (12). С. 95-98.

22. Михневич И.В. Сравнительное исследование характеристик материалов, применяемых в быстровозводимых сооружениях / И.В. Михневич, С.Д. Николенко, А.В. Черемисин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 1 (41). С. 48-55.

23. Николенко С.Д. Обеспечение безопасности труда при погрузочно-разгрузочных работах / С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, В.Я. Манохин, М.В. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2016. № 1. С. 22-27.

24. Николенко С.Д. Влияние параметров автомобильных дорог на экологическую безопасность / С.Д. Николенко // В сборнике: Научно-методическое обеспечение создания военной инфраструктуры вооруженных сил Российской Федерации. Москва, 2009. С. 229-236.

25. Николенко С.Д., Ткаченко А.Н., Федулов Д.В. Особенности технологических схем приготовления фибробетона. В сборнике: Актуальные проблемы современного строительства. материалы Международной научно-технической конференции, (Пенза, 23-25 апреля 2007 года). под общей редакцией Т. И. Барановой. Пенза, 2007. С. 320-323.

26. Николенко С.Д. Применение фибрового армирования в зданиях и сооружениях, расположенных в сейсмоопасных районах. В сборнике: Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях. межвузовский сборник научных трудов. Воронежский государственный технический универ-

ситет, Международная академия наук экологии безопасности человека и природы; В. И. Федянин – ответственный редактор. Воронеж, 2006. С. 38-46.

27. Николенко С.Д., Михневич И.В. Сравнительный анализ быстровозводимых сооружений для использования в чрезвычайных ситуациях. Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2013. № 4 (13). С. 43-48.

28. Николенко С.Д. К вопросу экологической безопасности автомобильных дорог. Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения. 2008. № 1. С. 141-145.

### **References**

1. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed-reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, constructions / F.N. Rabinovich // M.: Publishing House of DIA, 2011. 642 p.

2. SP 52-104-2006. Steel-reinforced concrete structures.

3. Nikolenko S.D. Behaviour of concrete with a disperse reinforcement under dynamic loads / S.D. Nikolenko, E.A. Sushko, S.A. Sazonova, A.A. Odnolko, V.Ya. Manokhin // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 7 (75). P. 3-14.

4. Ignatyuk A.S. The process of thermal imaging inspection of building enclosing structures / A.S. Ignatyuk, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 66-72.

5. Vereshchagin A.Yu. Program of geotechnical monitoring of objects included in the zone of influence of construction / A.Yu. Vereshchagin, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 4-9.

6. Andreev E.S. Modeling of defects in ultrasonic control of welded joints / E.S. Andreev, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 4-9.

7. Panteleev A.I. The process of inspection of load-bearing structures of technological overpasses / A.I. Panteleev, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 61-68.

8. Galaeva S.S. Investigation of the process of assessing the condition of wooden structures / S.S. Galaeva, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 10-16.

9. Startsev V.N. Analysis of the strength of the monolithic floor of the building and control of project documentation / V.N. Startsev, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 57-63.

10. Startsev V.N. Modeling of the thermally stressed state of the foundation and the development of measures to improve the operational properties of the tone / V.N. Startsev, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 64-71.

11. Sazonova S.A. Modeling of technological techniques for improving working conditions at a construction site / S.A. Sazonova, S.D. Nikolenko, A.A. Osipov // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 4. P. 71-83.

12. Sazonova S.A. Analysis of personal protective equipment and development of measures to improve working conditions in the warehouse / S.A. Sazonova, S.D. Nikolenko, N.V. Akamsina // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 4. P. 64-71.

13. Nikolenko S.D. Modeling of the process of wear of brick buildings / S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova, N.V. Akamsina // Modeling of systems and processes. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 44-50.

14. Korablin S.N. Modeling of temperature stresses in foundation slabs of a building / S.N. Korablin, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 54-60.

15. Proskurin D.K. Convergence of the computational process in the implementation of the variational method for solving the boundary value problem of hydrodynamics / D.K. Proskurin, D.V. Sysoev, S.A. Sazonova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2021. Vol. 17. No. 3. P. 14-19.

16. Merkulov A.S. Modeling of processes affecting the quality of concrete road surfaces / A.S. Merkulov, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 38-44.

17. Rogov N.Yu. Modeling of the process of inspection of reinforced concrete supports of technological overpasses / N.Yu. Rogov, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Modeling of systems and processes. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 68-73.

18. Sazonova S.A. Modeling of dangerous internal forces when using a mixed method of statically indeterminate frames with rods of a given stiffness / S.A. Sazonova, V.F. Asminin, A.V. Zvyagintseva // Modeling of systems and processes. 2021. T. 14. No. 2. P. 44-54.

19. Sazonov S.A. calculation of the mixed method statically neoregelia required RAM with elements of high hardness and a numerical verification of the resulting calculations using the finite element method / S.A. Sazonova, V.F. Auminin, A.V. Zvyagintsev // Modeling of systems and processes. 2021. Vol. 14. No. 2. P. 54-66.

20. Sazonova S.A. Results of the development of mathematical models of flow distribution analysis for heat supply systems / S.A. Sazonova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2011. Vol. 7. No. 5. P. 68-71.

21. Golovina E.I. Integral point assessment of the severity of the work of operators of mixers of asphalt concrete plants in conditions of high dustiness of the working area / E.I. Golovina, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova, M.V. Manokhin, V.Ya. Manokhin // Scientific Bulletin of the Voronezh State Architectural and Construction University. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. 2016. № 1 (12). P. 95-98.

22. Mikhnevich I.V. Comparative study of the characteristics of materials used in prefabricated structures / I.V. Mikhnevich, S.D. Nikolenko, A.V. Cheremisin // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. 2016. № 1 (41). P. 48-55.

23. Nikolenko S.D. Ensuring labor safety during loading and unloading operations / S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova, V.Ya. Manokhin, M.V. Manokhin // Scien-

tific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: High technology. Ecology. 2016. No. 1. P. 22-27.

24. Nikolenko S.D. Influence of parameters of highways on ecological safety / S.D. Nikolenko // In the collection: Scientific and methodological support for the creation of the military infrastructure of the armed forces of the Russian Federation. Moscow, 2009. P. 229-236.

25. Nikolenko S.D., Tkachenko A.N., Fedulov D.V. Features of technological schemes for the preparation of fiber concrete. In the collection: Actual problems of modern construction. Materials of the International Scientific and Technical Conference, (Penza, April 23-25, 2007). under the general editorship of T. I. Baranova. Penza, 2007. P. 320-323.

26. Nikolenko S.D. The use of fiber reinforcement in buildings and structures located in earthquake-prone areas. In the collection: Life support and management systems in emergency situations. intercollegiate collection of scientific papers. Voronezh State Technical University, International Academy of Sciences of Ecology, Human Safety and Nature; V. I. Fedyanin - Executive Editor. Voronezh, 2006. P. 38-46.

27. Nikolenko S.D., Mikhnevich I.V. Comparative analysis of fast-moving structures for use in emergency situations. Scientific journal. Engineering systems and structures. 2013. No. 4 (13). pp. 43-48.

28. Nikolenko S.D. On the issue of environmental safety of automobile roads. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems of construction materials science. 2008. No. 1. P. 141-145.

---

**Николенко Сергей Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета  
**Сафонова Светлана Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета  
**Звягинцева Алла Витальевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

УДК 532.5.013.4

**К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ  
АНОМАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

*Б.М. Кумицкий, С.Г. Тульская, Е.С. Аралов\*, Е.В. Плаксина*

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*\*Адрес для переписки: Аралов Егор Сергеевич, E-mail: vgtu.aralov@yandex.ru*

В рамках основных положений механики сплошной среды предложен метод количественной оценки эффективной (пластической) вязкости аномальных жидкостей, в частности бингамовской среды, свойства которой входит широкий спектр структурно-механических систем, используемых в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности. Методика исследования основана на представлении стационарного течения нелинейной жидкости в вертикальной трубе конечной длины. В предположении ламинарного течения бингамовской жидкости, находящейся в поле сил тяготения, получены выражения гидродинамических параметров, позволяющих экспериментально получить значение коэффициента вязкости. Установлены границы, отделяющие поверхности вязкой жидкости от твердого тела.

*Ключевые слова: аномальная жидкость, бингамовская среда, пластическая вязкость, стационарное течение*

**TO THE METHOD OF DETERMINING THE VISCOSITY COEFFICIENT  
OF ABNORMAL LIQUIDS**

*B.M. Kumitskiy, S.G. Tul'skaya, E.S. Aralov\*, E.V. Plaksina*

*\*Corresponding author: Aralov Egor Sergeevich, E-mail: vgtu.aralov@yandex.ru*

Within the framework of the basic provisions of continuum mechanics, a method is proposed for quantitative evaluation of the effective (plastic) viscosity of anomalous liquids, in particular the Bingham medium, the properties of which include a wide range of structural and mechanical systems used in mining and processing industries. The research methodology is based on the representation of a stationary flow of a nonlinear fluid in a vertical pipe of finite length. Under the assumption of a laminar flow of a Bingham fluid located in the field of gravitational forces, expressions of hydrodynamic parameters are obtained that allow experimentally obtaining the value of the viscosity coefficient. The boundaries separating the surfaces of a viscous liquid from a solid are established.

**Keywords:** *anomalous liquid, Bingham medium, plastic viscosity, stationary flow*

**Введение.** Исследование течения вязких жидкостей является актуальной задачей практической гидромеханики. Это связано с использованием их в добывающей, химической, перерабатывающей и пищевой отраслях промышленности [1], а также интенсивно развивающемся трубопроводном транспорте [2-4]. С целью обеспечения требуемых условий транспортировки жидкой среды с минимальными энергетическими затратами необходимы данные о физико-механических свойствах движущихся материалов.

Одним из наиболее важных гидродинамических параметров, подлежащих численному определению, является вязкость в силу того, что основная доля энергетических потерь магистральных трубопроводах возникает из-за трения [5,6].

Для теоретического исследования течения вязких жидкостей предложены математические модели, основанные на принципах механики сплошной среды [7-10]. При этом, для выяснения температурной зависимости вязких свойств нелинейных жидкостей и взаимосвязи между сдвиговыми напряжениями и гра-

диентом скорости, используются численные методы [3,4]. С целью экспериментального определения величины коэффициента вязкости применяются известные вискозиметрические методы, основанные на различных гидродинамических принципах [11-13]. Закон Пуазейля для течения вязкой жидкости в капилляре под действием сил тяготения и перепада давлений используется в вискозиметре Оствальда [13]. Экспериментальный замер малой скорости равномерного прямолинейного движения шарика небольшого диаметра вязкой жидкости под действием взаимно уравновешенных сил тяжести, Архимеда и трения используется для определения вязкости методом Стокса [12,13]. Ротационные вискозиметры позволяют косвенно определить коэффициент вязкости, измеряя скорость вращения цилиндра вязкой жидкости [7]. Однако большинство перечисленных математических моделей носят описательный характер и не содержат сведений о зависимости степени нелинейности и величины эффективной вязкости от скорости течения аномальных жидкостей. А известные экспериментальные вискозиметрические методы пригодны, по существу лишь для ньютоновских жидкостей.

В настоящей работе предлагается метод определения коэффициента вязкости жидкостей, реологические свойства которых описывается вязкопластической моделью Бингама [14]. Интерес к исследованию обусловлен тем, что примерами жидкости такого типа является масляные краски, шламы, сточные грязи, буровые растворы, некоторые продукты нефтепереработки.

### **Аналитическое описание методы определения коэффициента вязкости**

Рассмотрим стационарное течение вязкопластической жидкости в вертикальной трубе длиной  $L$  и диаметра  $D$ , для которой  $D \ll L$ . Выберем в ней соосный элементарный цилиндр радиуса  $r$  и длины  $d_z$  (рис. 1).

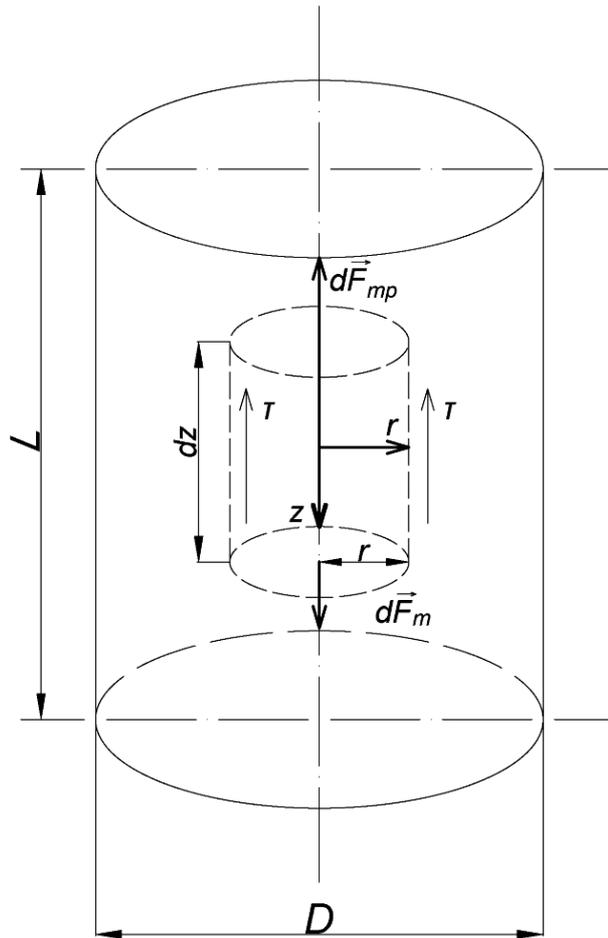


Рис. 1. Схема стационарного течения элемента вязкой жидкости в вертикальной круглой трубе под действием сил тяготения  $d\vec{F}_m$  и трения  $d\vec{F}_{mp}$

Стационарность течения достигается тем, что произвольно выбранный элементарный цилиндр испытывает на своей боковой поверхности действия сил трения:

$$dF_{mp} = \tau \cdot dS = \tau \cdot 2\pi r \cdot dz, \quad (1)$$

которые уравновешиваются силами тяготения, действующими в объеме цилиндра:

$$dF_m = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dz, \quad (2)$$

где  $\tau$  - касательные напряжения, под действием которых находится боковая поверхность цилиндра;  $\rho$  - плотность исследуемой жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения.

Приравнивая (1) и (2), получим  $\tau \cdot 2\pi \cdot r \cdot dz = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dz$ , или

$$\tau = \frac{\rho \cdot g \cdot r}{2}. \quad (3)$$

Среда Бингама является упругой до тех пор, пока касательные напряжения не достигнут предела текучести  $\tau_0$ .

По достижении этой величины начнется течение материала в каждой точке объема, а касательные напряжения и скорости деформации при этом подчиняются условию [14]:

$$|\tau| = \tau_0 + \eta \left| \frac{dv}{dr} \right|, \quad (4)$$

где  $\eta$  - коэффициент пластической вязкости;  $\left| \frac{dv}{dr} \right|$  - модуль градиента скорости жидкости.

В нашем случае, как и в механической задаче с трением, напряжения  $\tau$  является отрицательной величиной и условие (4) принимает вид:

$$-\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr}. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5), для области  $r_0 < r \leq R$  получим выражения:

$$-\frac{\rho g r}{2} = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr}, \quad \text{или} \quad dv = -\frac{\tau_0}{\eta} dr - \frac{\rho g r dr}{2\eta}. \quad (6)$$

Интеграция (6), получим

$$v(r) = -\frac{\tau_0}{\eta}r - \frac{\rho g r^2}{4\eta} + c,$$

где  $c$  – постоянная интегрирования, которая при граничном условии  $r = R$  имеет величину

$$c = \frac{\tau_0}{\eta}R + \frac{\rho g R^2}{4\eta}. \quad (7)$$

С учетом (7) зависимость скорости течения жидкости по сечению трубы становится равной

$$v(r) = \frac{\tau_0}{\eta}(R - r) + \frac{\rho g}{4\eta}(R^2 - r^2). \quad (8)$$

Величиной, измеренной экспериментально, может быть расход жидкости  $Q$ :

$$Q = \int_0^R 2\pi r \cdot v(r) dr, \quad (9)$$

либо средняя скорость  $\langle v(r) \rangle$ :

$$\langle v \rangle = \frac{1}{R} \int_0^R v(r) dr. \quad (10)$$

Подставляя значение (8), в выражения (9) и (10) и интегрируя их, получим формулы для косвенного определения пластического коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{\pi R^3 (8\tau_0 + 3\rho g R)}{24Q}, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{R(3\tau_0 - \rho g R)}{6\langle v \rangle}. \quad (12)$$

### Анализ результатов

Следует заметить, что напряжение, определяемая зависимостью (3), для всех  $r < r_0$ , где  $r_0 = \frac{2\tau_0}{\rho g}$ , принимает значения  $\tau < \tau_0$  текучесть не наступает и среда ведет себя как твердое тело. Действительно, выражение (8) показывает, что распределение скорости по сечению трубы представляет собой сумму двух слагаемых, одно из которых описывается линейным законом Ньютона для вязкой жидкости. При  $r = r_0$  значение  $v(r_0)$  соответствует величине

$$v(r_0) = \frac{\rho g (R - r_0)^2}{4\eta}. \quad (13)$$

Это означает, что в области  $r_0 < r \leq R$  распределение скорости по сечению соответствует выражению (8), а область, соответствующая границе  $0 < r < r_0$  движется как твердое тело со скоростью (13).

На рис. 2 представлены эпюры скорости и действующих напряжений по сечению трубопровода с указанием границ, разделяющих, области жидкой и квазитвердой структур, возникающих при движении бингамовских сред.

Видно, что течение жидкости, как таковой, наблюдается лишь в пристеночной области, соответствующей значениям  $r_0 < r \leq R$ . В части трубы со значениями радиуса  $0 < r < r_0$  бингамовская среда движется подобно твердому телу. Причем граница  $r_0$  определяется величиной напряжения текучести  $\tau_0$ . Распределения же сдвиговых напряжений по поперечному сечению трубы  $\tau(r)$  определяется линейной функцией в соответствии с рис. 2 (б).

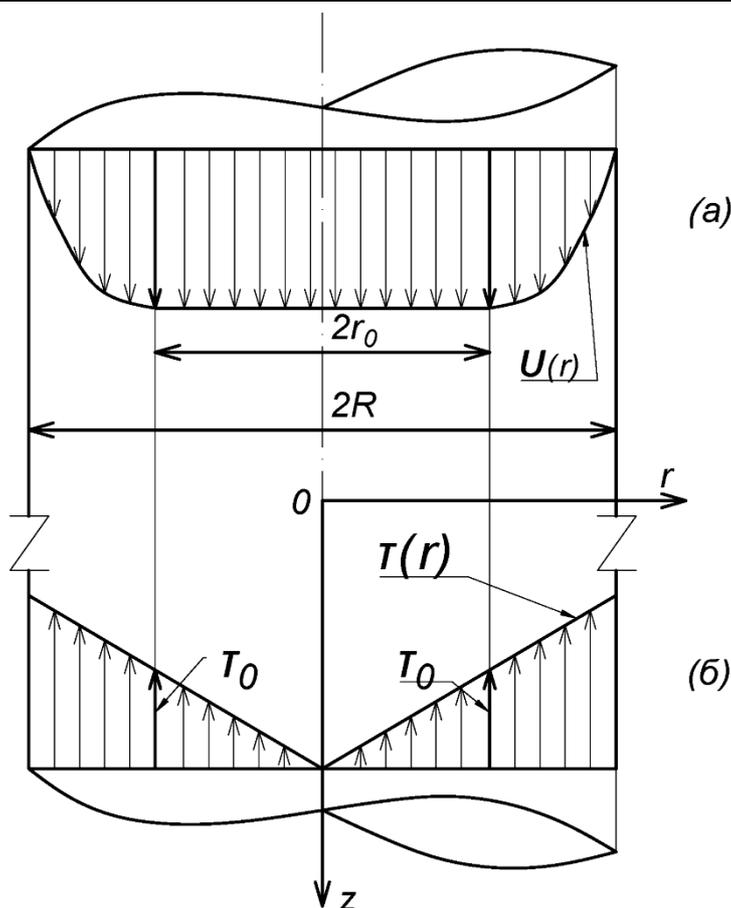


Рис. 2. Эпюры скорости движения  $v(r)$  (а) и напряжения  $\tau(r)$  (б) бингамовской среды по сечению круглой трубы радиуса  $R$ ;  $r_0$  – радиус окружности, отделяющей жидкую среду от твердой структуры;  $\tau_0$  - напряжения течения.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

Предложена методика исследования течения жидкости, находящейся в поле сил тяготения, позволяющая экспериментально определить значения пластического коэффициента вязкости бингамовской среды.

Получены формулы для косвенного определения коэффициента вязкости аномальной жидкости.

Показаны распределения скорости течения и напряжений сдвига по сечению трубы для бингамовской жидкости.

Определены границы, отделяющие области, в которых бингамовская среда ведет себя как жидкость и как твердый конгломерат.

Полученные аналитические выражения в работе могут быть использованы для определения вязких свойств глинистых и цементных растворов, масляных красок и некоторых продуктов нефтепереработки.

### **Список литературы**

1. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепция, методы, приложения / СПб.: 2007. 251 с.

2. Чехонин К.А., Сухонин П.А. Движение нелинейно-вязкопластичной жидкости со свободной поверхностью при заполнении осесимметричного объема. // Математическое моделирование. 2011. Т. 13. № 3. С. 89-102.

3. Харламов С.Н., Терещенко Р.Е. Неизотермическое реологическое течение сложных вязких сред с переменными свойствами в элементах трубопроводных систем. // Горный информационно - аналитический бюллетень. 2013. № 4. С. 293-298.

4. Матвиенко О.В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью СИСКО, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 56. С. 100-113.

5. Борзенко Е.И., Шрагер Р.Г., Якутенок В.А. Течение неньютоновской жидкости со свободной поверхностью при заполнении круглой трубы // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 3. № 2. С. 53-60.

6. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем // Томск.: изд-во ТГАСУ. 2015. 312 с.

7. Кумицкий Б.М., Саврасова Н.А., Коротких Н.И. Использование принципов механики сплошной среды для исследования вязкости псевдопластических и дилатантных жидкостей // Научный журнал инженерные системы и сооружения. 2015. № 1 (18). С. 44-49.

8. Перминов А.В., Любимов Т.П. Устойчивость стационарного плоскопараллельного течения псевдопластической жидкости в плоском вертикальном слое // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 3. С. 286-300.

9. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 75. С. 1129-1137.

10. Матвиенко О.В., Базуев О.П., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 1. С. 192-199.

11. Кумицкий Б.М., Сарычев С.Г. Реологическое моделирование истечения жидкости при переменном напоре из вертикального трубопровода // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2017. № 4 (9). С. 19-23.

12. Пономарев С.В., Мищенко С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей // Тамбов; изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та. 1997. 249 с.

13. Осовская И.И., Антонова В.С. Практическая вискозиметрия. Учебное пособие // СПб. 2018. 79 с.

14. Гноевой А.В., Климов Д.М., Чесноков В.С. Основы теории течения бингамовских сред. - М.: Физматлит. 2004. 272 с.

## References

1. Malkin A.Ya., Isaev A.I. Rheology: concept, methods, applications / SPb.: 2007. 251 p.

2. Chehonin K.A., Sukhonin P.A. Movement of a nonlinear viscoplastic fluid with a free surface when filling an axisymmetric volume. // Mathematical modeling. - 2011. vol. 13. No. 3. P. 89-102.

3. Kharlamov S.N., Tereshchenko R.E. Non-isothermal rheological flow of complex viscous media with variable properties in elements of pipeline systems. // Mining information and Analytical Bulletin. 2013. No. 4. P. 293-298.

4. Matvienko O.V. Investigation of the steady-state flow of a pseudoplastic fluid described by the CISCO model in a cylindrical tube // Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics. 2018. No. 56. P. 100-113.
5. Borzenko E.I., Shrager R.G., Yakutenok V.A. Flow of a non-Newtonian fluid with a free surface when filling a round pipe // Butt mechanics and technical physics. 2012. vol. 3. No. 2. P. 53-60.
6. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Mathematical models of production processes for the preparation of bitumen dispersed systems // Tomsk.: publishing house of TSASU. 2015. 312 p.
7. Kumitsky B.M., Savrasova N.A., Korotkikh N.I. Using the principles of continuum mechanics to study the viscosity of pseudoplastic and dilatant liquids // Scientific Journal Engineering systems and structures. 2015. № 1 (18). P. 44-49.
8. Perminov A.V., Lyubimov T.P. Stability of stationary plane-parallel flow of pseudoplastic fluid in a flat vertical layer // Computational mechanics of continuous media. 2014. V. 7. No. 3. P. 286-300.
9. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.To. Mathematical modeling of flow swirling flow of dilatant fluid in a cylindrical channel // journal of Engineering physics. 2014. T. 87. No. 75. P. 1129-1137.
10. Matvienko O.V. Bazuev O.P., Uranova N.K. Mathematical modeling of flow swirling flow of dilatant fluid in a cylindrical channel // journal of Engineering physics. 2014. Vol. 87. No. 1. P. 192-199.
11. Chomicki B.M., Sarychev S.G. Rheological modeling of liquid outflow at a variable pressure of the vertical tubing // urban Planning. Infrastructure. Communications. 2017. № 4 (9). P. 19-23.
12. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V. Methods and devices for measuring effective thermophysical characteristics of technological fluid flows // Tambov; publishing house of Tambov State Technical University. un-ta. 1997. 249 p.
13. Osovskaya I.I., Antonova V.S. Practical viscometry. Textbook // SPb. 2018. 79 p.

14. Gnoevoy A.V., Klimov D.M., Chesnokov V.S. Fundamentals of the theory of the flow of bin-Gamov media // М.: Fizmatlit. 2004. 272 p.

---

**Кумицкий Борис Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела Воронежского государственного технического университета

**Тульская Светлана Геннадьевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела Воронежского государственного технического университета

**Аралов Егор Сергеевич** – старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела Воронежского государственного технического университета

**Плаксина Елена Владимировна** – старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела Воронежского государственного технического университета

УДК 617-089.844:615.36:611-013.85-032

## СОСУДИСТЫЕ СЕТИ В БИОСОВМЕСТИМЫХ ГИДРОГЕЛЯХ

*А.И. Отченашенко<sup>1\*</sup>, В.В. Корнеева<sup>2</sup>, М.С. Букша<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет*

*(Московский инженерно-физический институт),*

*Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31*

<sup>2</sup>*Воронежский государственный технический университет,*

*Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84*

<sup>3</sup>*Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко,*

*Российская Федерация, 394000, г. Воронеж, ул. Студенческая, 10*

*\*Адрес для переписки: Отченашенко Александр Иванович,*

*E-mail: alot.zte@gmail.com*

Органы полны различных сосудистых сетей, которые сложно устроены как биофизически, так и биохимически, поэтому их достаточно трудно воссоздавать и изучать. В данной статье демонстрируются монолитные прозрачные гидрогели, изготовленные за считанные минуты, включающие сосуды и функциональные двустворчатые клапаны. Дополнительно исследована оксигенация и поток крови во время приливной вентиляции и расширения дыхательных путей. Кроме того, был применен биоразлагаемый гидрогель в модели хронического повреждения печени на грызунах, чтобы подчеркнуть потенциал этого инновационного материала.

*Ключевые слова: биосовместимый гидрогель, сосудистая сеть, альвеолы, 3D печать*

## VASCULAR NETWORKS IN BIOCOMPATIBLE HYDROGELS

*A.I. Otchenashenko<sup>1\*</sup>, V.V. Korneeva<sup>2</sup>, M.S. Buksha<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>National Research Nuclear University*

*(Moscow Engineering Physics Institute),*

*Russian Federation, 115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31*

*<sup>2</sup>Voronezh State Technical University,*

*Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84*

*<sup>3</sup>Voronezh State Medical University N.N. Burdenko,*

*Russian Federation, 394000, Voronezh, ul. Studencheskaya str. 10*

*\*Corresponding author: Alexander I. Otchenashenko,*

*E-mail: alot.zte@gmail.com*

Organs are full of various vascular networks, which are complex both biophysically and biochemically, so they are difficult to recreate and study. This article demonstrates monolithic transparent hydrogels made in minutes, including vessels and functional bivalve valves. Additionally, oxygenation and blood flow were investigated during tidal ventilation and airway dilation. In addition, a biodegradable hydrogel was applied in a rodent model of chronic liver injury to highlight the potential of this innovative material.

**Keywords:** *biodegradable hydraulic gel, adherent mesh, alveoli, 3D seal*

**Введение.** Кровеносная и легочная система физически и эволюционно устроены сложно [1]. У дышащих воздухом позвоночных эти ограниченные и сохраненные топологии сосудов взаимодействуют, обеспечивая кислородозависимое дыхание всего организма [2-4]. Чтобы построить и исследовать мягкие гидрогели, содержащие такие биомиметические и многососудистые архитектуры, была использована стереолитография [5], обычно применяемая для эффективного преобразования фотоактивных жидких смол в пластиковые детали посредством локальной фотополимеризации [6, 7]. По сравнению с экструзионной 3D-печатью, при которой воксели наносятся последовательно [8-12], фотосши-

вка может быть сильно распараллелена за счет проецирования изображения для одновременной и независимой обработки миллионов вокселей за один шаг. В стереолитографии разрешение по  $X$  $Y$  определяется световым путем, тогда как разрешение по  $Z$  определяется светопоглощающими добавками, которые поглощают избыточный свет и ограничивают полимеризацию до желаемой толщины слоя, тем самым улучшая точность изображения. В отсутствие подходящих фотопоглощающих добавок трехмерное фотоструктурное моделирование мягких гидрогелей было ограничено по типам рисунков, которые могут быть созданы [13-16], или требовали сложной, дорогой и малопродуктивной микроскопии для повышения разрешения по оси  $Z$  с помощью многофотонного эффекта. [17-19]. Однако обычные блокирующие свет химические вещества, используемые для формирования рисунка из фоторезиста или изготовления пластиковых деталей, не подходят для биопроизводства из-за их известных генотоксических и канцерогенных характеристик [20]. Таким образом, идентификация нетоксичных светоблокаторов для проекционной стереолитографии может обеспечить значительный прогресс в разработке и создании широко используемых биосовместимых гидрогелей.

Синтетические и натуральные пищевые красители, повсеместно используемые в пищевой промышленности, были использованы в качестве мощных биосовместимых фотопоглотителей для обеспечения стереолитографического производства гидрогелей, содержащих сложные и функциональные сосудистые структуры.

Водные прегидрогелевые растворы, содержащие тартразин (желтый пищевой краситель, E102), куркумин (из куркумы) или антоцианин (из черники), использовались для получения биосовместимых гидрогелей. Помимо этих органических молекул, неорганические наночастицы золота (50 нм), широко известные своей биосовместимостью и светопоглощающими свойствами [21], также действуют как эффективная фотопоглощающая добавка для создания перфузионных гидрогелей.

Чтобы понять, как эти фотопоглотители влияют на кинетику гелеобразования фотополимеризуемых гидрогелей, были получены фотореологические характеристики с помощью кратковременного воздействия света, которое указывает на то, что эти добавки вызывают дозозависимую задержку индукции фотосшивания. Воздействие насыщающего света, выходящее за пределы точки прекращения реакции, демонстрирует, что подходящие добавки в конечном итоге не мешали реакции, поскольку гидрогели в конечном итоге достигли эквивалентного модуля упругости, независимо от концентрации добавки. В качестве фотоабсорбера для дальнейших исследований был выбран тартразин. В дополнение к его низкой токсичности для людей и широкому применению в пищевой промышленности [22], наблюдалось, что этот гидрофильный краситель легко вымывается из образовавшихся гидрогелей (70% элюируется в течение 3 часов), в результате чего получают почти прозрачные конструкции, подходящие для визуализации. Некоторое количество тартразина также может разлагаться во время полимеризации, поскольку тартразин, как известно, чувствителен к свободным радикалам [23]. Погружение гелей в воду или физиологический раствор для удаления растворимого тартразина также очищает сосудистую топологию и удаляет непрореагировавший раствор предварительного гидрогеля. В отличие от тартразина, куркумин является липофильным и не вымывается водными растворами; антоцианин имеет пиковое поглощение вдали от предполагаемого источника света с длиной волны 405 нм, что требует высоких концентраций для необходимой активности частиц; наночастицы золота имеют оболочку, что делает невозможным использование просвечивающей или флуоресцентной микроскопии.

Фотоабсорбирующие добавки необходимы для создания емкости при фотополимеризации итиолоновых [24] гидрогелей и в непрерывном технологическом процессе получения поверхности раздела жидкостей [6]. Наблюдалось сильное расслоение и механические деформации узорчатого гидрогеля. Создание последних с цилиндрическими сосудами, ориентированными перпендикулярно оси световой проекции, предполагает широкую гибкость конструкции

для создания сложных топологий сосудов, а оптическая прозрачность получаемых гидрогелей подразумевает методы визуализации, подходящие для оценки потоков жидкости.

Была исследована способность получать гидрогели, содержащие функциональные внутрисосудистые топологии. Сначала были рассмотрены хаотические смесители: внутрисосудистые топологии, которые гомогенизируют жидкости в результате взаимодействий между потоками жидкости и геометрией сосуда [25, 26], тогда как статические смесители макромасштаба нашли широкое применение в промышленных процессах [27] благодаря своей эффективности, преобразование внутрисосудистых статических смесителей в микрофлюидные системы было трудно реализовать из-за их сложной трехмерной топологии. С этой целью создали монолитные гидрогели с помощью встроенного статического смесителя, состоящего из трехмерных элементов с витыми ребрами (толщиной 150 мкм) с переменной хиральностью внутри цилиндрического канала диаметром 1 мм. При подачи ламинарных потоков жидкости к статическому смесителю при низком числе Рейнольдса (0,002) наблюдалось быстрое перемешивание на единицу длины (рис. 1, А) в зависимости от числа ребер.

Эластичность гидрогелей на основе полиэтиленгликоля (ПЭГ) позволила легко создать трехмерный функциональный двустворчатый венозный клапан (рис. 1, В). Створки клапана динамичны, быстро реагируют на пульсирующие антероградные и ретроградные потоки и способствуют образованию стабильных зеркальных вихрей в пазухах клапана (рис. 1, В) в соответствии с установленными картами нативной ткани [28, 29].

Возможность создавать такие многососудистые топологии в биосовместимых и водных средах поможет открытиям в области биоматериалов и тканевой инженерии. Первой целью является разработка эффективной основы для проектирования сложных сетей, которые могут предоставить подходящие схемы для их изготовления в гидрогелях. Отдельные сосудистые сети не должны прямо перемешивать жидкость, иначе они топологически сведутся к единой соединенной сети.

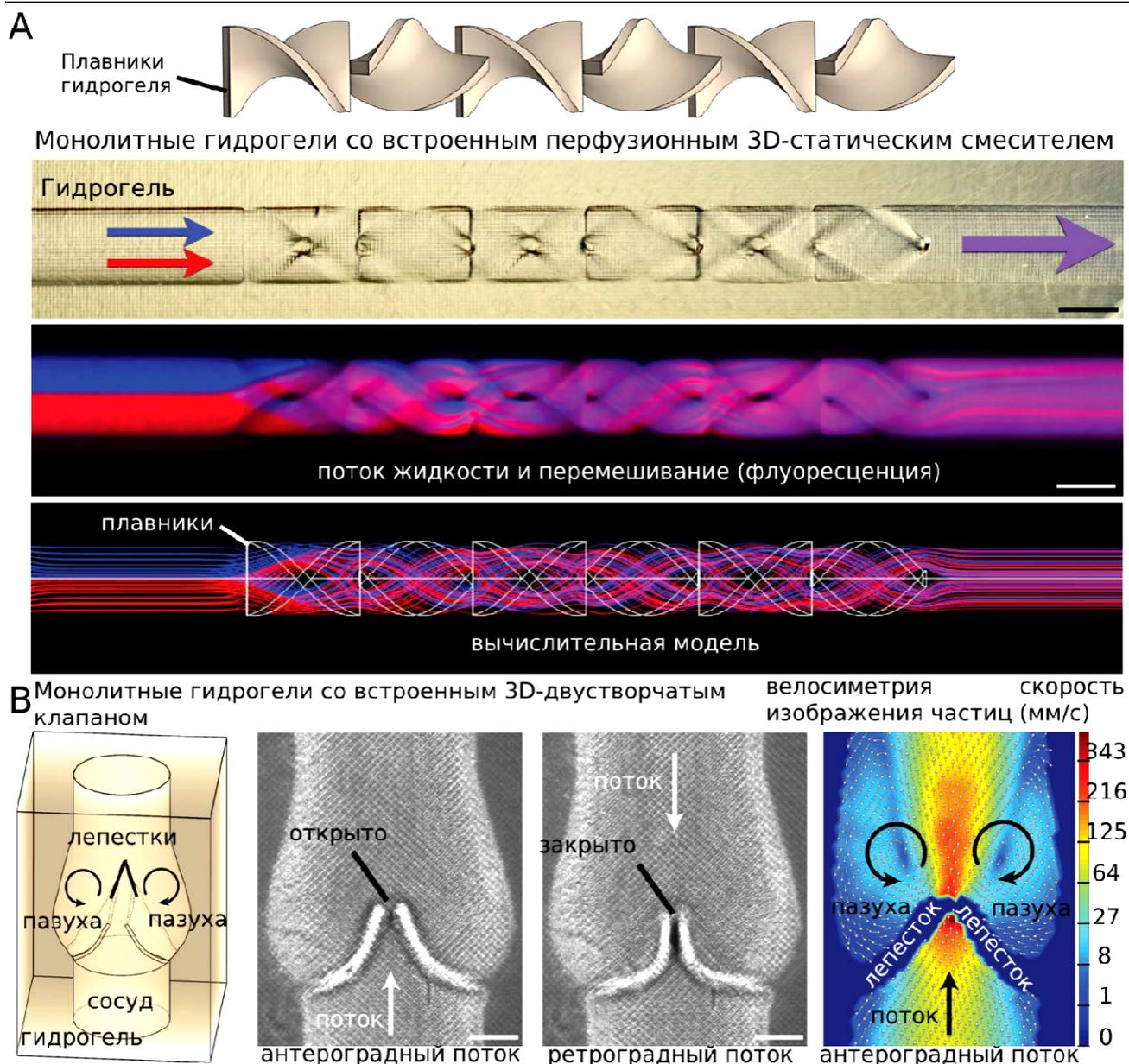


Рис. 1. Монолитные гидрогели с функциональной внутрисосудистой топологией. (А) Монолитные гидрогели с перфузируемым каналом, содержащим интегрированные плавниковые элементы с переменной хиральностью. Эти статические элементы способствуют разделению и перемешиванию жидкости (как показано на флуоресцентной визуализации) в соответствии с вычислительной моделью потока (масштабные линейки, 1 мм). (В) Гидрогели с функциональным трехмерным двустворчатым клапаном, интегрированным в стенку сосуда при антероградном и ретроградном потоках (масштабные линейки, 500 мкм). Велосиметрия с изображением частиц демонстрирует стабильные зеркальные вихри в области синуса за открытыми створками клапана

Математические алгоритмы заполнения пространства и фрактальной топологии обеспечивают эффективный параметрический подход для разработки сложных схем сосудов (рис. 2). Выбор гидрогелей (20 мас.%, 6 кДа ПЭГ диакрилат), содержащих запутанные сосудистые сети, на основе трехмерных мате-

математических алгоритмов (рис. 2, от А до D): спираль, окружающая осевой сосуд, кривые Гильберта  $1^\circ$  и  $2^\circ$ , бинепрерывная кубическая решетка (на основе Р-поверхности Шварца) и торс торическим узлом. Перфузия с использованием цветных красителей и анализ микрокомпьютерной томографии (мКТ) демонстрируют достоверность рисунка, проходимость сосудов и независимость между двумя сетями (рис. 2, от А до D).

Эффективность межсосудистого интерстициального транспорта измерена путем доставки кислорода из исходного сосуда к эритроцитам, в прилегающей трехмерной топологии. Сложная спиральная топология, показанная на рис. 2, А, построена на расстоянии 300 мкм между сосудами (рис. 2, Е). Перфузия дезоксигенированных эритроцитов (парциальное давление кислорода ( $PO_2$ )  $\leq 40$  мм рт. насыщение кислородом ( $SO_2$ )  $\leq 45\%$ ) в спиральный канал при вентиляции увлажненным кислородом (7 кПа) вызывало заметное изменение цвета эритроцитов с темно-красного на входе до ярко-красного на выходе (рис. 2, Е и F). Сбор перфузированных эритроцитов показал значительно более высокие уровни  $SO_2$  и  $PO_2$  по сравнению с дезоксигенированными эритроцитами, загруженными на входе (рис. 2, G).

Несмотря на то, что конструкция спирали демонстрирует возможность межсосудистого переноса кислорода между трехмерными сложными сетями, были введены структурные особенности нативного дистального отдела легкого в биоинспирированную модель морфологии альвеол и транспорта кислорода. В частности, реализация трехмерных гидрогелей, которые содержат разветвленные сети и могут поддерживать механическое растяжение во время циклической вентиляции объединенных дыхательных путей, позволит исследовать характеристики морфологии легких, полученные из нативной структуры [30], и может обеспечить полный рабочий процесс для разработки и изучения новых функциональных топологий. За последние несколько десятилетий морфология альвеол математически стало возможным аппроксимировать как трехмерные мозаики многогранников, заполняющие пространство [31-34].

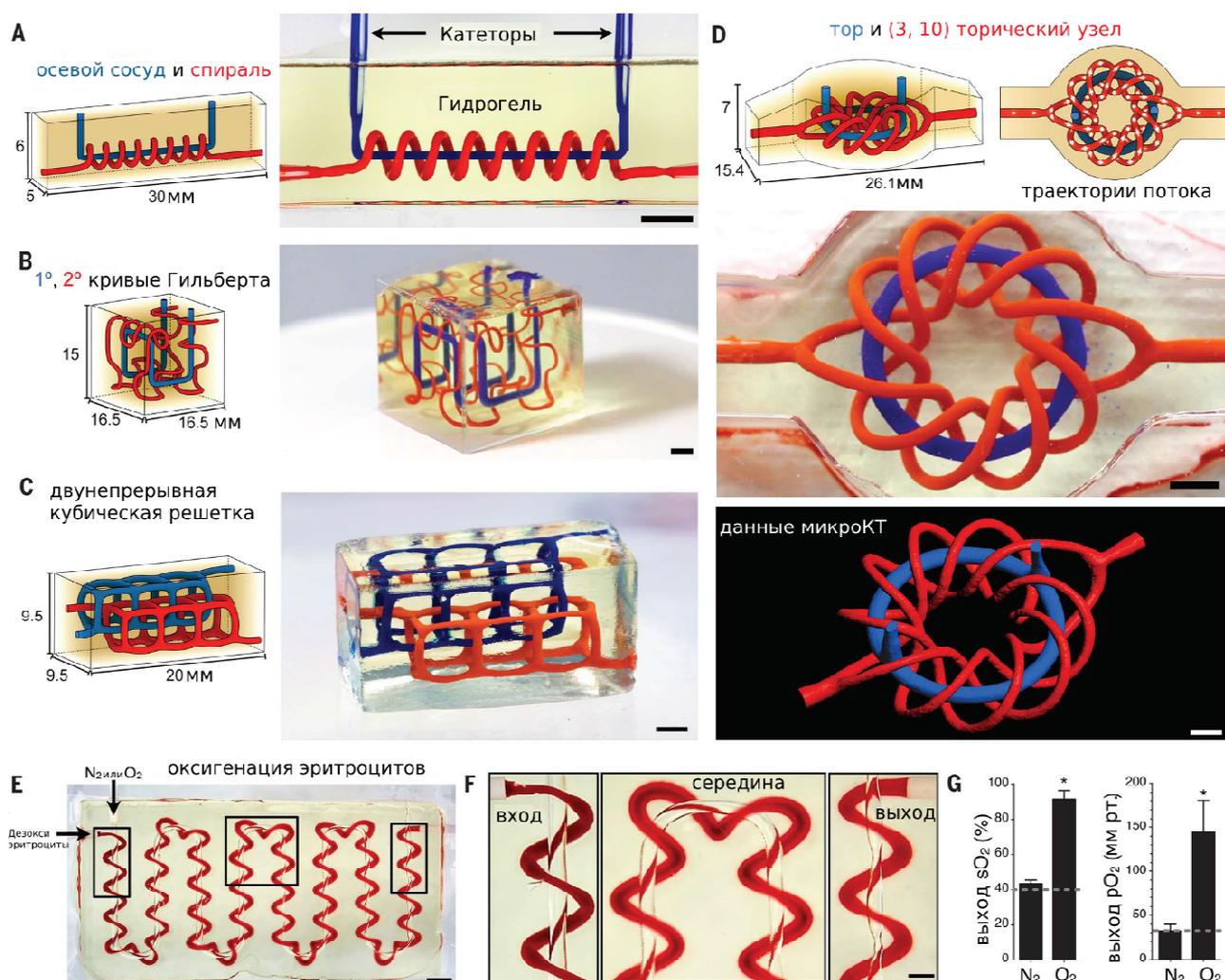


Рис. 2. Сложные сосудистые сети. (От А до D) Адаптация математических кривых заполнения пространства к топологии сосуда внутри гидрогелей (20 мас. % ПЭГ диакрилат, 6 кДа): (А) осевой сосуд и спираль, (В) взаимопроникающие кривые Гильберта, (С) биконтинуальная кубическая решетка, и (D) тор и торический узел (масштабные линейки, 3 мм). (Е) Тесселяция осевого сосуда и окружающей его спирали вдоль змеевидного пути. Фотография представляет собой вид сверху изготовленного гидрогеля с доставкой кислорода и эритроцитов в соответствующие сосуды. Во время перфузии эритроциты меняют цвет с темно-красного (на входе) на ярко-красный (на выходе) (шкала 3 мм). Области в рамке увеличены в (F) (масштабная линейка, 1 мм). (G) Перфузированные эритроциты собирали на выходе и количественно определяли SO<sub>2</sub> и PO<sub>2</sub>. Поток кислорода увеличил SO<sub>2</sub> и PO<sub>2</sub> перфузированных эритроцитов по сравнению с дезоксигенированными эритроцитами, перфузированными на входе (пунктирная линия) и отрицательным контролем потока азота (N ≥ 3 повторов, данные представляют собой среднее ± стандартное отклонение, \* P < 2 × 10<sup>-7</sup> по t-критерию Стьюдента)

Однако воплощение этих идей в реальность осталось достаточно сложным из-за необходимости получения эффективных мозаик, заполняющих пространство, и обволакивающей сосудистой сети, которая точно отслеживает кривизну трехмерной топографии дыхательных путей. Представленное реше-

ние состоит в том, чтобы рассчитать трехмерное топологическое смещение дыхательных путей и использовать новую поверхность в качестве шаблона, на котором строится сосудистый скелет. С помощью этого подхода была разработана биоинспирированная альвеолярная модель с обволакивающей сосудистой сетью из трехмерных мозаик топологии Вейра-Фелана [35] (рис. 3). Хотя основными элементами Вейра-Фелана являются выпуклые многогранники, трехмерные мозаики могут создавать поверхность, содержащую как выпуклые, так и вогнутые области, напоминающие естественные альвеолярные воздушные мешочки [30] с общим предсердием дыхательных путей, поддерживающим альвеолярные зачатки (рис. 3, А). Воздушная поверхность коллектора была расширена, удалены грани и образована сглаженная многоугольная сетка, чтобы сформировать разветвленную сосудистую сеть (содержащую 185 сегментов сосудов и 113 точек разветвления жидкости), которая охватывает дыхательные пути и отслеживает его кривизну.

Были напечатаны гидрогели (20 мас. %, 6 кДа ПЭГ диакрилат) с топологией альвеолярной модели при разрешении вокселей 5  $\mu\text{m}$  и времени печати 1 час (рис. 3, В). Циклическая вентиляция объединенных дыхательных путей увлажненным кислородом (10 кПа, 0,5 Гц) приводила к заметному растяжению и явному изменению кривизны вогнутых областей дыхательных путей. Перфузия дезоксигенированных эритроцитов на входе в кровеносный сосуд (от 10 до 100 мм / мин) во время циклической вентиляции приводила к наблюдаемому сжатию и удалению эритроцитов из сосудов, прилегающих к вогнутым областям дыхательных путей (рис. 3, В и С). При наблюдении за потоками разбавленных эритроцитов на ранних стадиях перфузии было обнаружено, что циклическое сжатие сосудов эритроцитов, вызываемое вогнутыми областями дыхательных путей при каждом цикле надувания, действует как переключающие клапаны для перенаправления потоков жидкости в соседние сегменты сосудов. Была реализована упрощенная двухмерная вычислительная модель надувания дыхательных путей, которая прогнозирует анизотропное растяжение дыхательных путей и сжатие соседних кровеносных сосудов, соответствующее локальной кривизне. Кроме того, анализ с помощью трехмерной вычислительной мо-

дели подтверждает анизотропное растяжение вогнутых областей дыхательных путей во время надувания (рис. 3, D). Несмотря на то, что объем гидрогеля альвеолярной модели (0,8 мл) составляет <25% от объема серпентиновоспиральной модели (3,5 мл), была измерена аналогичная эффективность оксигенации для двух конструкций (рис. 3, E).

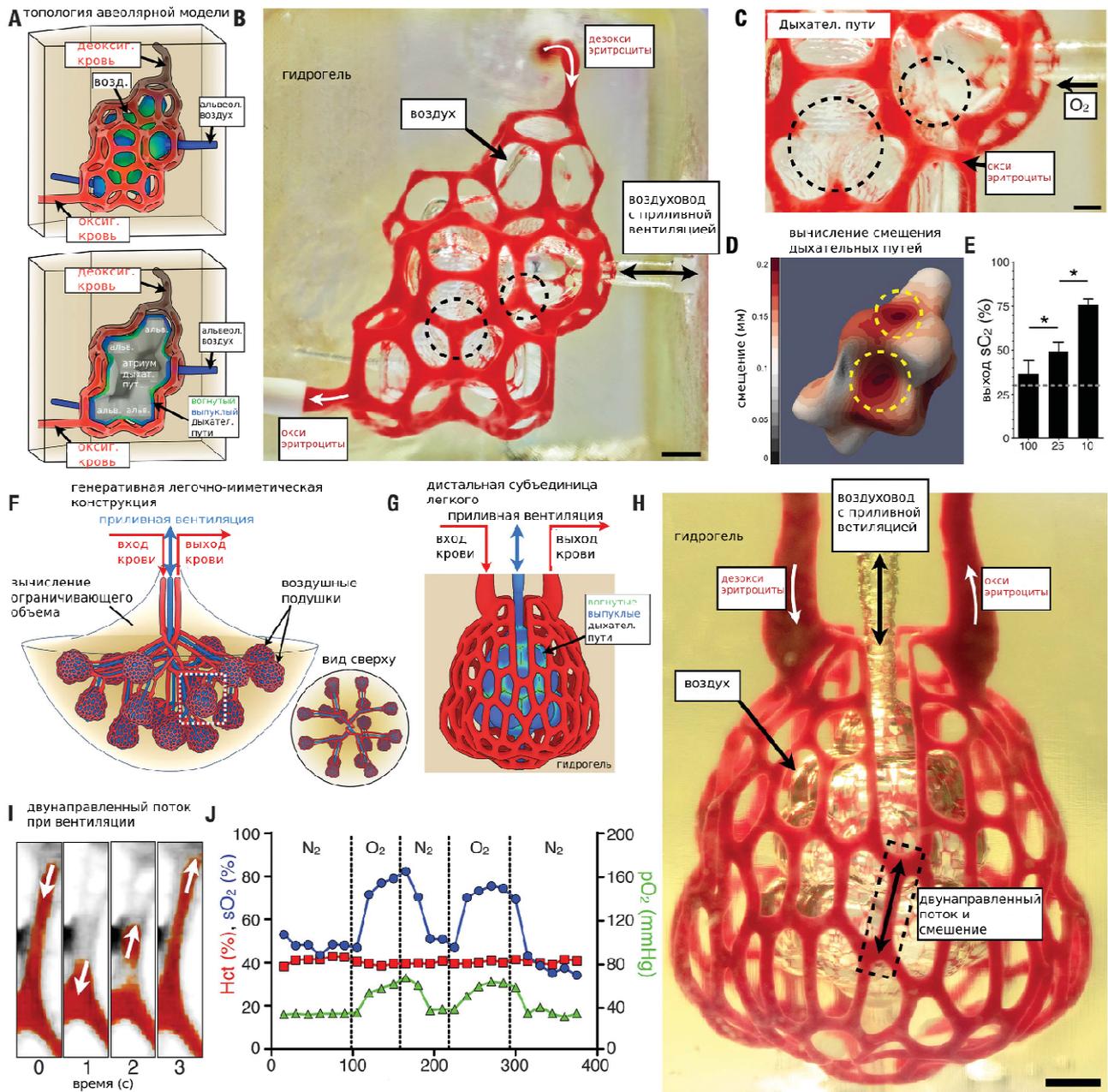


Рис. 3. Приливная вентиляция и оксигенация в гидрогелях с васкуляризованной топологией альвеолярных моделей. (А) (Вверху) Архитектурный дизайн топологии альвеолярной модели на основе трехмерной мозаики Вейра-Фелани топологического смещения для получения обволакивающей сосудистой сети. (Внизу) вид в разрезе иллюстрирует модельные альвеолы с общим предсердием дыхательных путей. Выделены выпуклая (синяя) и вогнутая (зеленая) области дыхательных путей. (В) Фотография напечатанного гидрогеля во время перфузии

эритроцитов, когда воздушный мешок вентилировался  $O_2$  (масштабная полоса, 1 мм). (С) При наполнении дыхательных путей кислородом вогнутые области дыхательных путей (пунктирные черные кружки) сжимают соседние кровеносные сосуды (масштабная линейка, 500 мкм). (D) Вычислительная модель надувания дыхательных путей демонстрирует увеличенное смещение в вогнутых областях (пунктирные желтые кружки). (E) Насыщение кислородом эритроцитов увеличивается с уменьшением скорости потока эритроцитов ( $N = 3$ , данные являются средними  $\pm$  стандартное отклонение, \*  $P < 9 \times 10^{-4}$  по t-критерию Стьюдента). Пунктирная линия показывает  $SO_2$  дезоксигенированных эритроцитов, перфузированных на входе. (F) Разработка конструкции, имитирующей легкие, посредством генеративного роста дыхательных путей, компенсации роста противоположных впускных и выпускных сосудистых сетей и кончиков ветвей дистальной субъединицей легкого. (G) Дистальная субъединица легкого состоит из вогнутых и выпуклых дыхательных путей, заключенных в сосудистую сеть за счет трехмерного смещения и анизотропной мозаики Вороного. (H) Фотография напечатанного гидрогеля, содержащего дистальную субъединицу легкого во время перфузии эритроцитов, когда воздушный мешок вентилировался  $O_2$  (масштабная полоса, 1 мм). (I) Пороговое изображение области, обведенной пунктирной рамкой на (H), демонстрирует двуправленный поток эритроцитов во время вентиляции. (J) Дистальная субъединица легкого может стабильно выдерживать вентиляцию более 10 000 циклов (24 кПа, 0,5 Гц) и демонстрирует чувствительность эритроцитов к вентиляционному газу ( $N_2$  или  $O_2$ )

Данные показывают, что топология ветвления, растяжение гидрогеля и перенаправление потоков жидкости во время вентиляции могут усилить внутрисосудистое перемешивание и обеспечить более быстрое объемное поглощение кислорода хорошо перемешанными эритроцитами. Сужение сосудов во время дыхания было ранее описано как важный механизм контроля жидкости в легких млекопитающих [36], в данном исследовании предлагаются средства для реализации этихидей в полностью определенных биосовместимых материалах и в водной среде.

Чтобы расширить эту работу до согласованного приближения к масштабируемому дизайну, нужно объединить расположение сосудистого входа, выхода сосудов и воздуховода, так чтобы дистальные субъединицы легких могли быть заселены на концах многомасштабной архитектуры ветвления. Следовательно, в пределах заданного вычислительного ограничивающего объема сначала выводится ветвящийся дыхательный путь (рис. 3, F). Затем осевые линии выпускных сетей кровеносных сосудов разворачиваются на  $180^\circ$  и смещаются от дыхательных путей, а кровеносные сосуды проходят вниз до концов всех дочерних ветвей. Последним шагом является заполнение верхушек каждого дистального отдела легкого альвеолярной элементарной ячейкой (рис. 3, G). Обволакивающая сосудистая сеть (содержащая 354 сегмента сосудов и 233 точки

ветвления жидкости) сама по себе представляет собой анизотропную мозаику диаграммы Вороного вдоль топологического смещения локальных дыхательных путей. Было обнаружено, что гидрогели (20 мас.%, 6 кДа ПЭГ диакрилат) могут выдерживать более 10 000 циклов вентиляции (при 24 кПа и частоте 0,5 Гц) в течение 6 часов во время перфузии эритроцитов и при переключении входящего газа между увлажненным кислородом и увлажненным азотом (рис. 3, от Н до J). Отфильтрованные по цвету изображения ранних стадий перфузии эритроцитов (рис. 3, I) показывают, что вентиляция способствует смешиванию эритроцитов и двунаправленным потокам внутри выбранных сегментов сосудов около средней точки дистальной субъединицы легкого.

Стереолитографический аппарат для тканевой инженерии (САДТИ) использовался, чтобы продемонстрировать производство тканевых конструкций, содержащих клетки млекопитающих. Миметики легких также могут быть заселены фибробластами легких человека в объеме интерстициального пространства и эпителиально-подобными клетками человека в дыхательных путях, что может способствовать разработке гидрогелевого аналога легких [37]. Также были изготовлены первичные мезенхимальные стволовые клетки (МСК) человека (со смесями ПЭГ диакрилата и метакрилата желатина), и показано, что клетки внутри изготовленных цилиндрических гидрогелей остаются жизнеспособными и могут подвергаться остеогенной дифференцировке. Эти исследования показывают, что изготовление САДТИ поддерживает быстрое биопроизводство, а также жизнеспособность клеточных линий млекопитающих дифференциацию первичных стволовых клеток человека, предоставляя экспериментально поддающиеся лечению средства для изучения дифференцировки стволовых клеток как функции доставки через сосуды.

Также была предпринята попытка установить необходимость этого процесса для изготовления структурно сложных и функциональных тканей для терапевтической трансплантации. В частности, для печени – самого большого твердого органа в организме человека, выполняющего сотни важных задач, которые, как считается, зависят от ее структурной топологии. Были созданы сложные структурные элементы в гидрогеле в рамках расширенного конструктивного пространства, предоставленного САДТИ для сборки и изготовлены од-

ноклеточные ткани и гидрогелевые носители, содержащие агрегаты гепатоцитов (рис. 4, от А до С). Активность промотора альбумина тканевых носителей, нагруженных агрегатами, была увеличена более чем в 60 раз по сравнению с таковой у имплантированных тканей, содержащих отдельные клетки (рис. 4, В и С). Кроме того, при макроскопическом исследовании тканей после резекции оказалось, что искусственные ткани имеют хорошую интеграцию с природными тканями (рис. 4, D). Размер агрегатов печени накладывает существенные архитектурные ограничения на 3D-печать, потому что агрегаты больше по размеру, чем самое низкое разрешение вокселей (50 мкм). Чтобы учесть эти конструктивные ограничения, был создан более совершенный носитель, который может доставлять агрегаты печени в натуральном фибриновом геле и имеет сосудистый отсек, который может быть засеян эндотелиальными клетками, и включает структурное крепление гидрогеля для физического, а не химического удержания геля фибрина, чтобы облегчить ремоделирование между трансплантатом и природной тканью (рис. 4, E). Сети микроканалов были засеяны эндотелиальными клетками пупочной вены человека, потому что предыдущими исследованиями было продемонстрировано, что это улучшает приживание тканей [38]. Было оценено, выживут ли оптимизированные биоинженерные ткани печени после трансплантации на модели хронического повреждения печени на грызунах. После 14 дней приживания у мышей с хроническим повреждением печени носители печеночного гидрогеля проявляли активность промотора альбумина, что свидетельствует о выживании функциональных гепатоцитов (рис. 4, F). Иммуногистологическая характеристика выявила присутствие агрегатов печени, прикрепленных к напечатанным компонентам гидрогеля, которые положительно окрашивались для маркера цитокератина-18 (рис. 4, F и G). Дальнейшее исследование изображений, окрашенных гематоксилином и эозином, указало на присутствие природной крови в эксплантированных тканях. Иммуноокрашивание с использованием моноклональных антител подтвердило эритроидную идентичность клеток в микрососудах, прилегающих к микроагрегатам печени в эксплантированных тканях (рис. 4, G, справа). Данный подход обеспечивает устранение ограничений конструкции в тканевой инженерии, которые препятствовали прогрессу доклинических исследований.

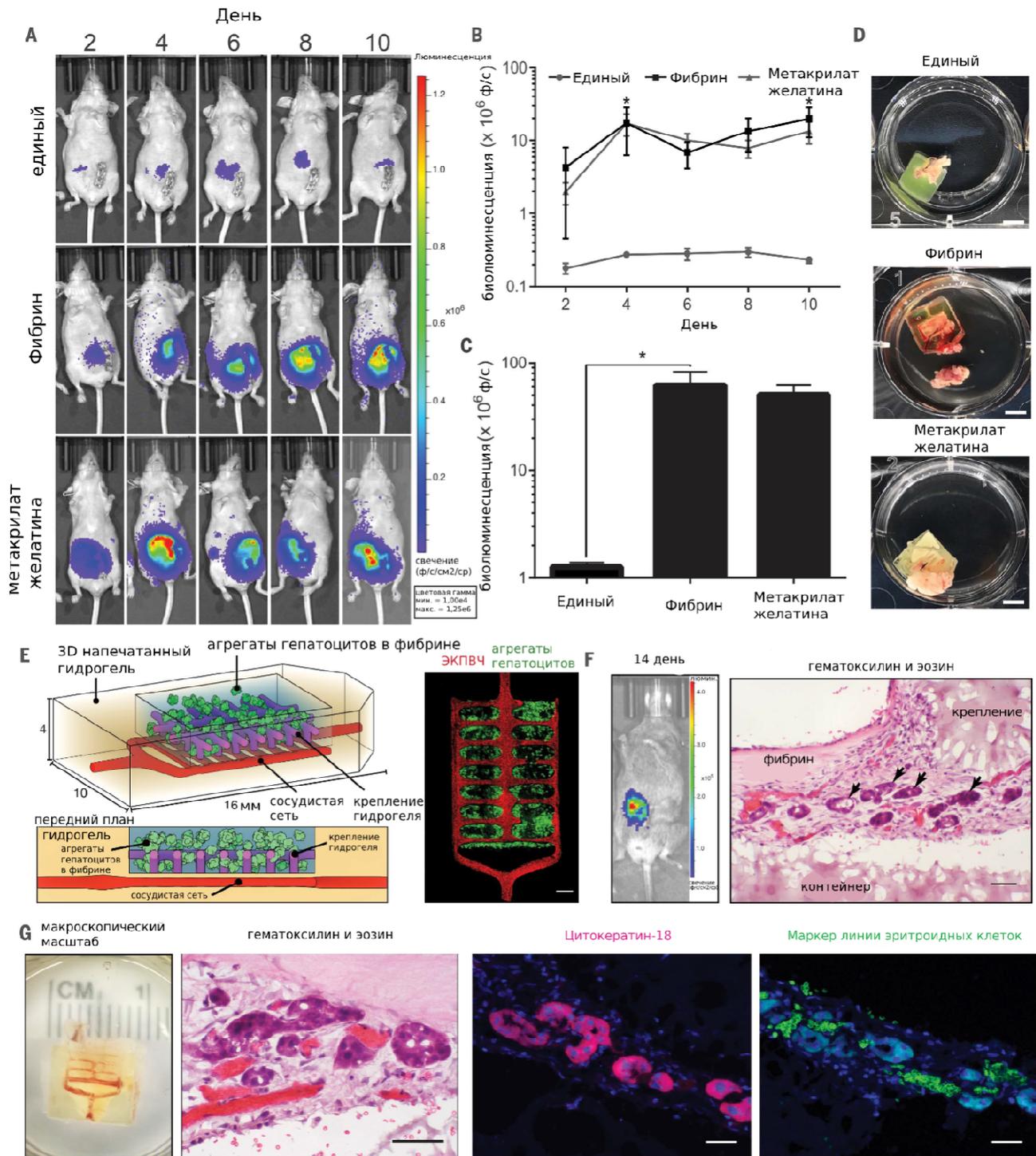


Рис. 4. Приживление функциональных носителей печеночного гидрогеля. (От А до С). Активность альбумина усиливалась в носителях гидрогеля, содержащих агрегаты печени, после имплантации мышам. Данные для всех временных точек для каждого условия показаны в (В) [N = 4, \* P < 0,05 с помощью двухфакторного дисперсионного анализа с последующим апостериорным тестом Тьюки]. Кумулятивная биолюминесценция для каждого состояния показана на (С) (N = 4, \* P < 0,05 с помощью однофакторного дисперсионного анализа с последующим апостериорным тестом Тьюки). (D) Общие изображения гидрогелей после резекции (масштабные полосы, 5 мм). (E) (Слева) Преваскуляризованные носители печеночного гидрогеля создаются путем посева эндотелиальных клеток в сосудистую сеть после печати. (Справа) Наблюдения с помощью конфокальной микроскопии показывают, что гидрогелевые крепления физически захватывают гель фибрина, содержащий агрегаты гепатоцитов

(масштабная линейка, 1 мм). (F) Гепатоциты в превааскуляризованных носителях печеночного гидрогеля проявляют активность промотора альбумина после имплантации мышам с хроническим повреждением печени. Срезы трансплантата, окрашенные гематоксилином и эозином, показывают расположение агрегатов печени (черные стрелки) относительно печатных (контейнер, крепление) и непечатных (фибрин) компонентов системы (масштабная линейка 50 мм). (G) Носители гидрогеля инфильтрованы природной кровью (гематоксилин и эозин). Носители содержат агрегаты, которые экспрессируют маркер цитокератин-18 и находятся в непосредственной близости от маркера эритроидных клеток (масштабные полосы, 40 мм)

Данным исследованием были определены легкодоступные пищевые красители, которые могут служить мощными фотопоглотителями для биосовместимого и цитосовместимого производства гидрогелей, содержащих функциональные сосудистые топологии, для изучения смесителей жидкости, клапанов, межсосудистого транспорта, доставки питательных веществ. Представленный стереолитографический процесс дает возможность одновременного и ортогонального контроля над архитектурой ткани и биоматериалами для конструкции регенеративных тканей, применяемых в трансплантологии.

### **Список литературы**

1. Р. Монахан-Эрли, А.М. Дворжак, В.К. Эйрд, Дж. Тромб. Гемост. 2013. Том 11. Стр.46-66.
2. Г.Р. Скотт, Дж. Biol.214. Стр.2455-2462 (2011).
3. Э.Р. Шахнер, Джон Р. Хатчинсон, К. Фармер, PeerJ 1, e60 (2013).
4. Фармер К.Г., Физиология 30, 260-272 (2015).
5. М. Эдер, С. Амини, П. Фратцль, Биологические композиты – сложные структуры для функционального разнообразия. Наука 362, 543-547 (2018).
6. J.R. Тамблстоун и др., Наука 347, 1349-1352 (2015).
7. Б.Э. Келли и др., Наука 363, 1075-1079 (2019).
8. Дж. С. Миллер и др., нац. Мать. 11. стр.768-774 (2012).
9. Т.Дж. Хинтон и др., Sci. Adv.1, e1500758 (2015).
10. Т. Бхатгачарджи и др., Sci. Adv.1, e1500655 (2015).
11. Д.Б.Коляски, К.А. Хоман, М.А. Скайлар-Скотт, Дж. А. Льюис, Прок. Натл. Акад. наук. США 113, 3179-3184 (2016).
12. Х.-В. Кан и др., нац. Биотехнология. 34. стр.312-319 (2016).

13. V. ЛюЦан и др., ФАСЕБ Дж. 21, 790-801 (2007).
14. Н. Лин и др., Биоматериалы 34, 331-339 (2013).
15. J.A.S. Нейман и др., Биотехнология. Биоинженерия. 112, 777-787(2015).
16. X. Ма и др., Прок. Натл. Акад. Sci. U.S.A. 113, 2206-2211 (2016).
17. M.S. Хан, Дж.S. Миллер, Дж. L. Запад, Adv. Мать. 18, 2679-2684(2006).
18. С.А. ДеФорест, К.S. Ансет, Нат. Хим.. 3, 925-931 (2011).
19. К.А. Хайнц и др., Adv. Здоровье. Мать. 5, 2153-2160 (2016).
20. Т.М. Фонович, Химик-наркологи. Токсикол. 36, 343-352 (2013).
21. S. Кумар, Дж. Аарон К. Соколов, Нат. Протокол. 3, 314-320 (2008).
22. L.J. Стивенс, Дж. R. Берджесс, М.А. Сточельский, Т. Кучек, Клини. Педиатр. 54, 309-321 (2015).
23. М. Ли и др., Дж. Сельхоз. Пищевая химия. 62, 12052-12060 (2014).
24. С.А. ДеФорест, Б.Д. Полиццотти, К.S. Ансет, Нат. Мать. Восемь, 659-664 (2009).
25. А.Д. Струк и др., Наука 295, 647-651 (2002).
26. D. Террио, С.Р. Уайт, Дж.А. Льюис, Нат. Мать. 2, 265-271 (2003).
27. А. Ганем, Т. Леменанд, Д. Делла Валле, X. Пирхоссейни, Хим. Анг. Вещь. Des. 92, 205-228 (2014).
28. F. Лури, Р.Л. Кистнер, Б. Эклоф, Д. Кесслер, Дж. Вакс. Хирург. 38, 955-961 (2003).
29. E. Базигу, Т. Мякинен, Сотовый. Моль. Наука о жизни. 70, 1055-1066 (2013).
30. С.С.В. Ся, Д.М. Хайд, Э.Р. Вайбель, компр. Физиол. Шесть, 827-895 (2016).
31. J. Мид, Т. Такисима, Д. Лейт, Дж. <url>. Физиол. 28, 596-608(1970).
32. А. Линхартова, В. Колдуэлл, А.Е. Андерсон, Анат. Запись. Двестичетырнадцать, 266-272 (1986).
33. Y.C. Фанг, Дж. Физиол. 64, 2132-2141 (1988).

34. Р. Хофемайер, Дж. Шнитман, Дж. Биомех. Англ. 136, 061007 (2014).
35. D. Уэйр, Р. Фелан, Философ. Журнал. Латук. 69, 107-110 (1994).
36. J.B. Запад, С.Т. Доллери, А. Наймарк, Дж. <url>. Физиол. Девятнадцать, 713-724 (1964).
37. D. Ха и др., Наука 328, 1662-1668 (2010).
38. К.Р. Стивенс и др. Sci. Перев. Медицинский. 9, eaah5505 (2017).

### References

1. R. Monahan-Earley, A.M. Dvorak, W. C. Aird, J. Thromb. Haemost. 11 (suppl. 1), 46-66 (2013).
2. G.R. Scott, J. Exp. Biol. 214, 2455-2462 (2011).
3. E.R. Schachner, J. R. Hutchinson, C. Farmer, PeerJ 1, e60 (2013).
4. C.G. Farmer, Physiology 30, 260-272 (2015).
5. Supplementary figures, as well as materials and methods, are available as supplementary materials.
6. J.R. Tumbleston et al., Science 347, 1349-1352 (2015).
7. B.E. Kelly et al., Science 363, 1075-1079 (2019).
8. J.S. Miller et al., Nat. Mater. 11, 768-774 (2012).
9. T.J. Hinton et al., Sci. Adv. 1, e1500758 (2015).
10. T. Bhattacharjee et al., Sci. Adv. 1, e1500655 (2015).
11. D.B. Kolesky, K.A. Homan, M.A. Skylar-Scott, J.A. Lewis, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 3179-3184 (2016).
12. H.-W. Kang et al., Nat. Biotechnol. 34, 312-319 (2016).
13. V. Liu Tsang et al., FASEB J. 21, 790-801 (2007).
14. H. Lin et al., Biomaterials 34, 331-339 (2013).
15. J.A.S. Neiman et al., Biotechnol. Bioeng. 112, 777-787 (2015).
16. X. Ma et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 2206-2211 (2016).
17. M.S. Hahn, J.S. Miller, J.L. West, Adv. Mater. 18, 2679-2684 (2006).
18. C.A. DeForest, K.S. Anseth, Nat. Chem. 3, 925-931 (2011).
19. K.A. Heintz et al., Adv. Healthc. Mater. 5, 2153-2160 (2016).

20. T.M. Fonovich, Drug Chem. Toxicol. 36, 343-352 (2013).
21. S. Kumar, J. Aaron, K. Sokolov, Nat. Protoc. 3, 314-320 (2008).
22. L.J. Stevens, J.R. Burgess, M.A. Stochelski, T. Kuczek, Clin. Pediatr. 54, 309-321 (2015).
23. M. Li et al., J. Agric. Food Chem. 62, 12052-12060 (2014).
24. C.A. DeForest, B.D. Polizzotti, K.S. Anseth, Nat. Mater. 8, 659-664 (2009).
25. A.D. Stroock et al., Science 295, 647-651 (2002).
26. D. Therriault, S.R. White, J.A. Lewis, Nat. Mater. 2, 265-271 (2003).
27. A. Ghanem, T. Lemenand, D. Della Valle, H. Peerhossaini, Chem. Eng. Res. Des. 92, 205-228 (2014).
28. F. Lurie, R.L. Kistner, B. Eklof, D. Kessler, J. Vasc. Surg. 38, 955-961 (2003).
29. E. Bazigou, T. Mäkinen, Cell. Mol. Life Sci. 70, 1055-1066 (2013).
30. C.C.W. Hsia, D.M. Hyde, E.R. Weibel, Compr. Physiol. 6, 827-895 (2016).
31. J. Mead, T. Takishima, D. Leith, J. Appl. Physiol. 28, 596-608 (1970).
32. A. Linhartová, W. Caldwell, A.E. Anderson, Anat. Rec. 214, 266-272 (1986).
33. Y.C. Fung, J. Appl. Physiol. 64, 2132-2141 (1988).
34. P. Hofemeier, J. Sznitman, J. Biomech. Eng. 136, 061007 (2014).
35. D. Weaire, R. Phelan, Philos. Mag. Lett. 69, 107-110 (1994).
36. J.B. West, C.T. Dollery, A. Naimark, J. Appl. Physiol. 19, 713-724 (1964).
37. D. Huh et al., Science 328, 1662-1668 (2010).
38. K.R. Stevens et al., Sci. Transl. Med. 9, eaah 5505 (2017).

---

**Отченашенко Александр Иванович** – магистрант кафедры компьютерных медицинских систем Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института

**Корнеева Валерия Владиславовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**Букша Максим Сергеевич** – студент 5-го курса лечебного факультета Воронежского государственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко

УДК 666.972.1

**НАУКА И ГЛОБАЛЬНЫЕ ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА**

***О.Л. Фиговский***

*Хайфа, Израиль, Международный научно-исследовательский центр  
нанотехнологий «Полимат»*

*Адрес для переписки: Фиговский Олег Львович*

*E-mail: figovsky@gmail.com*

В статье описаны основные тенденции развития проектов, связанных с нанотехнологиями, искусственным интеллектом и роботизацией, описаны необходимые подготовительные этапы для обеспечения успеха науки в РФ, кратко говорится об организации науки и образования Израиля, обеспечившей научное и образовательное лидерство этой страны в мире.

***Ключевые слова:*** *искусственный интеллект, роботы, наука, высшее образование, организация науки, университеты, цифровизация обучения*

**SCIENCE AND GLOBAL CHALLENGES OF THE XXI CENTURY**

***O.L. Figovsky***

*Haifa, Israel, International Research Center for  
Nanotechnology «Polymat»*

*\*Corresponding author: Figovsky O.L. E-mail: figovsky@gmail.com*

The article describes the main trends in the development of projects related to nanotechnology, artificial intelligence and robotics, describes the necessary preparatory stages to ensure the success of science in the Russian Federation, briefly talks about the organization of science and education in Israel, which ensured the scientific and educational leadership of this country in the world.

*Keywords: artificial intelligence, robots, science, higher education, organization of science, universities, digitalization of education*

В этой статье нам хочется осветить наиболее значимые аспекты развития науки, технологий и техники в аспекте искусственного интеллекта, в меньшей мере, нанотехнологий, а также описать некоторые пути достижения основных целей этого развития, прежде всего, связанных с вопросами образования.

Одной из главных целей любых научных исследований является обеспечение наибольшего количества свободного времени у членов общества после внедрения в жизнь этого общества результатов деятельности ученых.

К сожалению, в современном мире многие думают, что глобальной целью любой деятельности является обеспечение себя сверх доходами. Но получение сверхдоходов подменяет основные ориентиры развития социума на ложные, о чем сказано, хотя и косвенно, в последнем докладе Римского Клуба [1].

Известный американский футуролог Рэй Курцвейл, предполагая, что технологии развиваются по экспоненциальному закону, в 2017 году разработал прогноз существования человечества на 100 лет вперед, буквально, расписав итоги внедрения результатов научных исследований на временные периоды, начиная с 2019 года [2]. Верификация его прогнозов прошедшими 2019 и 2020 годами дает основание утверждать, что Р. Курцвейл не во всем был прав. Так, например, он ошибся в предсказании повсеместного внедрения на планете в 2019 году беспроводных средств коммуникаций и передачи энергии. Футуролог не учел того обстоятельства, что технические системы развиваются не по экспоненциальному закону, а, скорее, по колебательному «закону синуса», когда скорость их развития периодически увеличивается или уменьшается [3].

Приведем небольшой пример колебательного принципа внедрения технологий в жизнь на примере одной из специальностей механико-математического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ). Недавно по моей просьбе был проведен устный опрос студентов одной из специальностей факультета. Результаты опроса показали, что студенты-программисты начали активно игнорировать получение информации с помощью глобальной сети интернет и цифровых технологий, а социальные сети стремительно теряют свою популярность среди молодежи, вплоть до того, что студенты ликвидируют личные аккаунты в соцсетях. Студенты начали предпочитать цифровым источникам информации работу в библиотеках и чтение печатных книг. Это радует, так как интернет, как показали психологи, в основном, порождает клиповое мышление [4], а шлемы и иные технические средства виртуальной реальности заставляют человека жить в вымышленном мире, значительно уменьшая его способности как для общения в «живом» мире, так и восприятия самого «живого» мира.

Если говорить о состоянии молодых людей, длительно работающих за компьютером, то бросается в глаза, прежде всего, массовое ухудшение физических способностей юношей и девушек. Первые, порой, выглядят, как некие аморфные тела, не способные пробежать самую малую дистанцию без одышки. Этот, казалось бы, незначительный факт, сигнализирует о возможном начале вырождения человека как вида. Чтобы избежать вырождения нужно, прежде всего, людям, активно пользующимся в профессиональной деятельности средствами цифровых технологий, заниматься спортом: эта рекомендация, на наш взгляд, в недалеком будущем, может быть принята в некоторых наиболее мудрых странах на законодательном уровне.

Таким образом, решение задач широкого внедрения информационных технологий в жизнь общества должна носить, прежде всего, комплексный характер, предусматривающий все аспекты существования социума.

Но кратко остановимся на основных направлениях развития технологий с применением искусственного интеллекта.

Обращает на себя, прежде всего, то, что создание робототехники стремительно движется в направлении автономных роботов, т.е. роботов, самостоятельно, вне человека принимающих решения. Особенную тревогу вызывает использование таких машинных способностей, предназначенных для решения боевых задач.

Хочется подчеркнуть, что именно на решение задач войны с помощью роботов направлена преобладающая часть финансовых затрат практически всех развитых государств мира, занимающихся разработкой методов ИИ.

Так как автономным принятием решений с помощью ИИ в боевых действиях преследуется, в числе прочего, глобальная цель – высвобождение времени людей, – то можно сказать, что роботы в этом случае удовлетворяют главной цели развития технологий, описанной в начале статьи. Если произойдет очередная мировая война, то она будет скоротечной, стремительной, с массовым уничтожением всего сущего на Земле. И эта война будет вестись роботами, самостоятельно принимающими решения и практически без участия человека в боевых действиях.

Зачастую разработчики боевых роботов повторяют и используют идеи, описанные ранее в литературных произведениях писателями-фантастами. О глобальной войне с помощью роботов можно, например, прочитать в рассказе «Последняя битва» американского писателя Роберта Шекли, вышедшей из печати в семидесятых годах прошлого века. А о современных боевых роботах и боевых дронах, основанных на применении ИИ, можно узнать из совместных работ автора настоящей статьи профессора ПГНИУ О.Г. Пенского [5, 6].

Не будем больше говорить о боевых роботах и «боевом» искусственном интеллекте, тем более что информацию о конкретных проектах можно легко найти в ресурсах сети интернет.

Для создания любого типа роботов – боевых и не боевых – необходимы, прежде всего, исследования ученых.

Поэтому остановимся на наиболее перспективных, на наш взгляд, направлениях научных изысканий.

Современная наука сегодня может, наверное, решить, если не все, то большинство поставленных перед ней задач. Прогнозы футурологов гласят, что человечество движется в эпоху технологической сингулярности, при которой все, любые поставленные перед учеными задачи смогут быть успешно решены в небольшие временные сроки.

Поэтому в будущем особенно значимыми станут ученые, способные ставить новые задачи. Такие люди ценились во все времена, исключая, наверное, только лишь средневековье, но работа постановщиков-исследователей станет особенно актуальна в человеческом обществе в ближайшей перспективе.

Если говорить о далекой перспективе, то можно отметить, что в настоящее время израильские ученые уже приступили к разработке методов искусственного интеллекта, способного выдвигать научные гипотезы в математике [7]. Израильцы начали именно с математики, как наиболее формализованной науке. Известно, что гипотезы в основе своей и являются новыми задачами для развития любой науки.

К. Маркс писал, что наука только тогда становится наукой, когда она начинает широко использовать математику [8]. Поэтому в недалекой перспективе ученые-программисты смогут научить искусственный интеллект выдвигать новые гипотезы также в других науках, которые уже сейчас широко используют математику.

Хочется сказать о «психологических» особенностях принципиально новых проектов. Главным достоинством создателей таких проектов является то, что ученые-новаторы впервые ставят перед человечеством нестандартные задачи, способные значительно обогатить знания об окружающем мире, и открывают новые законы развития мира, о которых ранее никто даже не задумывался. Нестандартные идеи, как правило, порождают мощную критику в научном мире, которая, зачастую, уничтожает попытки познания нового.

Сейчас, в частности в России, довольно сложно «протолкнуть» в научное сообщество нестандартные по своей сути идеи даже, если они сопровождаются теорией, подтвержденной правдивыми экспериментами. Поэтому множество

идей, родившихся в России, исчезают в никуда. Одной из причин этого является, например, работа комитета РАН по лженауке (отмечу, что этот термин был введен во времена СССР, когда кибернетика и генетика признавались лженаукой), который, как правило, признает нелженаучными те исследования, которые одобрены большими научными школами, основанными на результатах исследований середины прошлого века и весомыми современными, пускай, и очень престарелыми, академиками.

В аспекте написанного выше хотелось бы рассказать о том, как организована адекватная оценка нестандартных научных идей и проектов и их продвижение в промышленность в Израиле.

В Израиле официально существует Независимая Академия Наук, в которой занимаются новыми нестандартными с традиционной научной точки зрения проектами, существуют гранты, которые позволяют финансировать принципиально новые нестандартные исследования, а финансирование, порой, достигает сотен тысяч долларов. Для того, чтобы выиграть такой грант, заявитель должен предоставить на конкурс не только описание научной идеи, но и описание результатов исследований, показывающие закономерность явлений, подлежащих изучению в ходе выполнения гранта. Именно выявленные закономерности, открытые вновь причинно-следственные связи и их многочисленное экспериментальное обоснование делают науку настоящей наукой.

В некоторых серьезных научных журналах Израиля существуют разделы под названием «Нестандартные идеи». Я много лет был главным редактором научного журнала «Scientific Israel – Technological Advantages», и в моем журнале также был такой раздел, где авторы публиковали результаты своих исследований, в отличие от некоторых коммерческих изданий, бесплатно. Журнал «Scientific Israel – Technological Advantages» имел большую популярность в Израиле, России и мире. Авторам статей, опубликованных в журнале, выступали не только израильтяне, но и ученые со всего мира, в том числе, специалисты по искусственному интеллекту.

В качестве контрпримера расскажу о недавней ситуации, которая произошла в научном журнале ПГНИУ «Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика». Международная группа израильских и российских ученых направила в редакцию журнала статью, посвященную математическим моделям, которые описывают новый взгляд на природу явлений в ядерной физике. В результате экспертизы статья была отклонена и не принята к публикации из-за нестандартности взглядов, изложенных в рукописи. После отказа пермского журнала в публикации рукописи авторы направили статью в германский научный журнал «Deutsche internationale Zeitschrift für zeitgenössische Wissenschaft», где после рецензирования статья была опубликована [9] в течение месяца. Отмечу то, что авторам отвергнутой журналом ПГНИУ статьи, пришло приглашение немцев и в дальнейшем публиковать рукописи по затронутой авторами тематике в журнале «Deutsche internationale Zeitschrift für zeitgenössische Wissenschaft». Я думаю, что одним из основных недостатков российских журналов является некоторая косность в восприятии новых идей, консервативная приверженность к устаревшим традициям и забюрократченность при принятии решений, что отбрасывает российскую науку назад по сравнению, например, с европейскими странами.

В настоящее время в мировой науке особенно важными становятся междисциплинарные исследования. Именно на стыке наук рождаются новые открытия и генерируются принципиально новые идеи.

Выше я подверг критике работу одного из научных журналов ПГНИУ. Но в Пермском государственном национальном исследовательском университете рождаются и совершенно новые науки. Примерами этого являются научные направления, создаваемые профессором Б.М. Осовецким по наноминералогии и профессором О.Г. Пенским по математическому моделированию эмоциональных роботов – психологических цифровых двойников человека. Результаты исследований О.Г. Пенского, имеющие на сегодняшний день несомненный международный приоритет, опубликованы в научных журналах многих стран: России, Израиля, Индии, США, Польши, Белоруссии, Дании. Он читал лекции по

математическим моделям эмоциональных роботов студентам Оксфордского университета, Донецкого национального технического университета [10, 11], в Политехническом музее (г. Москва), ведет занятия у магистрантов ПГНИУ по теме «Математические модели цифровых двойников» [12].

Подробно о созданном О.Г. Пенским научном направлении мной опубликована большая статья в журнале ВАК РФ «Инженерный вестник Дона» [13], также сам профессор рассказывал о своих исследованиях в некоторых интервью радиостанциям Перми, недавно были записаны его развернутые ответы на вопросы телевидения г. Калуги [14, 15]. Тематика работ О.Г. Пенского относится к междисциплинарным исследованиям, а именно, к описанию формулами психологии человека. О.Г. Пенский имеет только одного научного конкурента в мировой науке – Мозговой Центр США по борьбе с терроризмом, который располагается в Калифорнийском университете. Но отличие работ пермского ученого от американцев состоит в разных математических подходах к описанию поведения людей. Исследования в США используют для этой цели модернизированную Центром математическую логику (созданную теорию рефлексий [16, 17]), а О.Г. Пенский со своими учениками – аппарат линейной алгебры, математического анализа и методов оптимизаций. Большой интерес международного научного сообщества к работам О.Г. Пенского подтверждает тот факт, что, например, всего две его публикации в научном журнале США «Intelligent Control and Automation» были скопированы читателями более 6800 раз и признаны редакцией журнала наиболее высокорейтинговыми публикациями этого издания [18].

Отметим то, что, начиная с 2019 г., исследования, основу которых заложил пермский профессор, начали проводиться совместно российскими и израильскими учеными, а в 2021 г. вышла в издательстве Российского Университета Дружбы Народов (г. Москва) монография О.Л. Фиговского и О.Г. Пенского «Люди и роботы» [19]. В книге авторы рассматривают проблемы и результаты взаимного сосуществования людей и роботов, в том числе психологические аспекты; приводят примеры сосуществования людей и роботов на всех этапах

жизни человека: от рождения до смерти; описывают прогнозы возможного развития робототехнического социума в ближайшем и далеком будущем; предлагают математические модели, позволяющие оценивать современное состояние и перспективы взаимоотношений людей и роботов.

Книга основана на оригинальных работах, опубликованных авторами в России и за рубежом в последние годы. Монография издана объемом в 368 страниц и предназначена как для специалистов в области гуманитарных наук (политологии, психологии, философии, экономики), технических, физико-математических наук, так и для широкого круга читателей, интересующихся вопросами сосуществования людей и роботов и перспектив этого сосуществования. Так как в монографии описываются современные достижения в робототехнике и даются ориентиры на будущее, то книга будет интересной и читателям, занимающимся инновационными проектами. В частности, книга может быть полезна для генерации собственных идей в создании новых роботов, комфортных для человека. В настоящее время готовится к изданию еще одна совместная монография тех же авторов под названием «Будущее начинается завтра (этюды о новых тенденциях в науке)». Новая книга будет, в основном, посвящена политическим аспектам существования социума в связи с его ускоряющейся роботизацией.

Журналист телевидения Калуги М. Дьяченко, окончивший МВТУ им. Баумана и Духовную семинарию РПЦ, в одной из своих передач сказал, что следующие Юрии Гагарины появятся именно в психологии и педагогике [14, 15]. Наверное, он прав, так как эти области научной и практической деятельности человека почти совсем не математизированы, а, существующие исследования несут гуманитарный характер, зачастую основанный на личных убеждениях больших ученых.

Отмечу, что за разработку математических моделей цифровых, двойников человека, имеющих авторский международный приоритет, О.Г. Пенский летом 2021 г. был награжден дипломом Ассоциации Изобретателей Израиля.

В настоящее время в технологически развитых государствах мира приступили к активным разработкам методов ИИ, целью которых является написание новых патентов на изобретения. В этом направлении уже есть первые успехи. Но для того, чтобы защитить авторские права живых, а не машинных изобретателей, в США идет работа над созданием закона, на основе которого изобретения, предложенные искусственным интеллектом, не будут патентоваться.

Если машины овладеют всеми тайнами изобретательства, то, по всей видимости, произойдет та же ситуация, что и с шахматами. Сейчас в шахматы компьютеры играют лучше гроссмейстеров, а поэтому шахматные партии для многих людей уже потеряли свою привлекательность. Не исключая того, «живое» изобретательство, благодаря ИИ, перейдет лишь в разряд человеческих спортивных творческих соревнований.

Роботы и искусственный интеллект, как уже было отмечено выше, стремительно врываются в жизнь социума. В настоящей статье мы не будем перечислять многочисленные существующие проекты, тем более, что ознакомиться этими проектами может каждый, обратившись к информационным ресурсам сети интернет. Но зададимся вопросом:

- Готово ли интеллектуально общество людей к совместному сосуществованию с роботами?

На мой взгляд, большая часть людей в настоящее время превращается только лишь в потребителей, не задумывающихся о перспективах того мира, в котором они живут. Для того, чтобы человечество осознало грядущее и не выпало из современности, крайне необходимо ввести новые образовательные дисциплины, например, в высших учебных заведениях.

В сентябре 2021 г. ректор Московского государственного университета В.А. Садовничий принял решение о введении в учебный процесс на всех факультетах вуза, включая гуманитарные, предметы, посвященные искусственному интеллекту [20]. Это решение совершенно правильное и весьма своевременное, так как молодые люди – будущее нашего общества – должны грамотно относиться к достижениям передовой науки.

В современном высшем образовании РФ очень много проблем, одной из причин этого являются непрерывные реформы, проходящие в организации обучения студентов. В аспекте искусственного интеллекта можно сказать, что сейчас взят курс, как мне кажется, на превалирующую цифровизацию обучения молодежи. Например, планируется ввести, так называемые, индивидуальные образовательные траектории для каждого студента. Их введение объясняется ориентацией на конкретные потребности существующего производства. Но индивидуальные образовательные траектории требуют огромного количества узких специалистов-преподавателей, так как круг задач, которыми занимаются промышленники, исчисляются если не сотнями тысяч, то, по крайней мере, десятками тысяч.

Единственным выходом из складывающейся ситуации является создание больших общих цифровых платформ с записями лекций тысяч узких специалистов по всей стране. Это означает массовое внедрение дистанционного образования и искусственного интеллекта в подготовку специалистов с высшим образованием. Руководители высшего образования России стремятся сразу после окончания студентами университетов сделать их пригодными для решения конкретных задач конкретного завода, компании и т.д. На мой взгляд, это тупиковое направление в обучении, так как выпускники вузов будут иметь очень узкопрофильные компетенции, которые лишат молодежь возможности быстро освоить новые дисциплины из-за отсутствия у нее хорошего фундаментального образования, не предусматриваемого индивидуальными образовательными траекториями.

Современное производство требует от его участника постоянное овладение новыми компетенциями.

Как известно, в Израиле университетов насчитывается меньше десятка, но все они входят в лидеры всех мировых рейтингов. В израильских вузах индивидуальные образовательные траектории не предусмотрены. Обучение в университетах проходит в обычном порядке с участием «живых» преподавателей и по общим программам, включающим большой набор фундаментальных

дисциплин. Но для удовлетворения запросов конкретных компаний выпускники могут после окончания вуза получить дополнительное образование, прослушав дистанционные «цифровые» курсы, которых в Израиле огромное количество. Именно благодаря разумности в организации учебного процесса, описанного выше, в Израиле ни цифровизация, ни внедрение искусственного интеллекта в образование не влекут угрозы государству.

Я периодически просматриваю новостную ленту сайта ПГНИУ [21]. Судя по содержанию размещенных новостей, можно сделать вывод о том, что в университете отсутствует связь научных поколений, так как в информации о научных проектах в качестве героев заметок указываются или только молодые люди, или только престарелые профессора и доценты. Складывается ощущение, что они работают вне зависимости друг от друга. Я думаю, что это, на самом деле, не так, потому что только передача опыта зрелых ученых молодым может способствовать плодотворным научным исследованиям. Однако содержание статей на сайте уверяет студентов в том, что гении рождаются сами без участия старших, что полностью искажает представление о развитии науки у молодежи, когда есть и учитель, и ученик.

Следует сказать, что в России в целом крайне необходимо восстанавливать именно преемственность научных поколений, которая, на мой взгляд, почти полностью разрушена. Не случайно только 10% выпускников аспирантуры университетов страны становятся кандидатами наук [22]. Причиной сложившейся ситуации является не только разрушенная преемственность научных поколений, но, наверное, как это ни покажется странным, низкая квалификация большого количества руководителей аспирантуры. На мой взгляд, сейчас целесообразно организовать в вузах круглые столы профессоров для обмена опытом успешных ученых по подготовке диссертаций учениками и выработке конкретных решений по исправлению сложившейся ситуации в каждом конкретном университете. Важно понять, что промедление в решении этого вопроса подобно смерти всей вузовской науки, по крайней мере, провинциальной.

Искусственный интеллект предлагает тем, кого это интересует, поучительную теоретическую метафору разума, благодаря которой можно с большей ясностью, чем раньше, формулировать психологические вопросы. Чем шире будут признаны как профессионалами, так и дилетантами его достоинства, тем меньшую угрозу будет представлять искусственный интеллект для понятий «Я» и «Общество» 84. Искусственный интеллект – «новая» попытка синтеза наук. Более того, он объединяет не только естественнонаучное и гуманитарное, но и инженерное познание [23]. Интересно, что как считает Ю.Ю. Петрунин роботы лучше работают, но им не нужно ничего покупать. Маркетинг, менеджмент, брендинг, спонсоринг и тому подобные способы извлечения прибыли не применим к Терминаторам и HAL 9000. Тем не менее, обращение к эволюционной идее весьма симптоматично. Оно означает кардинальную метаморфозу средневековой мифологемы искусственного интеллекта. Если ранее искусственный интеллект понимался как возрождение человека, то теперь как сменяющий *homo sapiens* вид в процессе развития информационных систем. Отсюда – бесконечные «машинные войны», восстания машин, ужасы будущего античеловеческого мира в нескончаемых романах, фильмах, произведениях живописи. Но частично сохраняется и другое, первоначальное ядро искусственного интеллекта как доброго друга и помощника человека в борьбе с невзгодами (яркие примеры – американский боевик «Робот-полицейский», отечественная комедия о девушке с искусственным интеллектом «Действуй, Маня!»), даже сам нуждающийся в человеческой помощи (культовый фильм «Скользкий по лезвию», «Искусственный разум» Стивена Спилберга). Какая тенденция победит, покажет лишь будущее [23].

Хочу, как специалист по нанотехнологиям, имеющий более 500 патентов на изобретения, более 300 из которых используются в различных компаниях развитых государств мира, немного сказать именно об организации исследований в этой сфере. Я не буду перечислять достижения в нанотехнологиях: все можно найти в интернете, а сделаю лишь небольшую ремарку. В штат Роснано входит более 500 человек. Израиль является одним из ведущих государств мира

по созданным инновационным технологиям. Штат государственной структуры Израиля, курирующей нанотехнологии, имеет всего 2 ставки: руководитель, трудоустроенный на 0.5 ставки, делопроизводитель (он же бухгалтер) – на 1 ставку, - и менеджер – организатор экспертиз проектов и различных общих мероприятий – на 0.5 ставки. Я думаю, что, если сравнить достижения Роснано и Израиля в области нанотехнологий, то анализ вышеприведенных чисел по ставкам позволит сделать правильный вывод об эффективности обеих структур Вам самим.

**Заключение.** Таким образом, только из написанного выше, конечно, затрагивающего далеко не все аспекты искусственного интеллекта и почти совсем не касающийся нанотехнологий и связанных с ним науки и образования, можно сделать следующие выводы:

– основными тенденциями в использовании искусственного интеллекта в науке является его применение в решении междисциплинарных задач, в том числе, связанных с творческими процессами человека;

– в настоящее время стремительно происходит внедрение искусственного интеллекта практически во все сферы практической деятельности человека, в том числе в его духовные процессы;

– необходимо осторожное и разумное внедрение методов искусственного интеллекта в образовательный процесс: без большой необходимости это повсеместное внедрение может нанести только вред;

– для внедрения искусственного интеллекта в образовательный процесс, требуется тщательное изучение опыта многих государств; наиболее удачным опытом, подтвержденным успешной практикой использования дистанционного обучения и ИИ в образовании, является многолетний опыт Израиля;

– необходимо тщательно изучить опыт Израиля в организации исследований, касающихся нанотехнологий, адаптировать его к каждому государству, исходя из местных условий, а затем внедрить его в организацию науки многих стран;

– согласно законам развития технических систем в ближайшие десять лет возможен серьезный спад интереса к цифровым технологиям и искусственному интеллекту, но ИИ будет активно использоваться без его нового качественного развития; эту двойную особенность необходимо учитывать при разработке стратегий технологического развития государств и методик образования;

– в РФ необходимо большее внимание уделять нестандартным научным проектам с обеспечением адекватной, вдумчивой экспертизы исследований; в научных журналах ввести отдельные рубрики, посвященные описанию результатов этих проектов;

– необходимо в вузах, в том числе провинциальных, поддержать инициативу ректора МГУ о введении учебных курсов по искусственному интеллекту на всех факультетах;

– для подготовки России к научным прорывам нужно, прежде всего, восстановить преемственность научных поколений;

– для увеличения количества защит диссертаций после аспирантуры необходима (в качестве одного из способов решения проблемы) организация круглых столов в вузах для обмена опытом научных руководителей аспирантур и выработки коллективных решений по мероприятиям в повышении эффективности аспирантуры в каждом конкретном университете.

Я перечислил лишь малое количество предложений по организации науки в стране, основываясь и на зарубежном, и на российском опыте. Но, если даже эти выводы будут полностью реализованы, то они принесут значительный эффект в рассматриваемом в настоящей статье вопросе. Поиск ответов на вопросы об увеличении эффективности науки – основной глобальный вызов XXI века.

### **Список литературы**

1. Моделирование и прогнозирование глобальных процессов: пределы роста в XXI веке. Доклад Римского клуба 16.04.2021. [Электронный ресурс].

2. Технологический прогноз на 100 лет от Рэймонда Курцвейла. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=blRZ7fQb68U>.
3. Законы развития технических систем. Учебник ТРИЗ. [Электронный ресурс] Мационг Е. Думай, как бот// Российская газета. 02.05.2018.
4. Мационг Е. Думай, как бот// Российская газета. 02.05.2018.
5. Фиговский О., Пенский О. Боевые роботы цивилизации землян// Наука и жизнь Израиля. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nizinev.co.il/novosti-nauki/boevye-roboty-civilizacii-zemlyan.html>.
5. Фиговский О., Пенский О. Дроны - мировые направления развития // Наука и жизнь Израиля. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nizinev.co.il/nauka/technicheskie-nauki/drony-mirovye-napravleniya-razvitiya.html>
7. Сердюкова М. Израильские инженеры создали генерирующий гипотезы искусственный интеллект. 21.08.2021. [Электронный ресурс].
8. Волкова В.О., Маслов В.М., Соснина Е.Н., Шетулова Е.Д., Ширшин Г.А. Философия науки: постнеклассические стратегии развития. Н.Новгород: изд-во НГТУ. 2015. 132 с.
9. Gurevich G.S., Pensky O.G. Mathematical modeling of processes of motion of a material point emitting from a central forcefield// German International Journal of Modern Science №17, 2021. P. 43-53.
10. Механико-математический факультет стал участником большого издательского проекта Оксфордского университета. [Электронный ресурс].
11. Донецких студентов научат моделировать эмоциональных роботов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=qg1ZiDE9G8I>.
12. Пенский О.Г. Математические модели цифровых двойников: учебное пособие. Пермь: изд-во ПГНИУ. 2019. 153 с.
13. Фиговский О.Л. О научном приоритете пермских ученых в моделировании «психологии» цифровых двойников человека// Инженерный вестник До-

на, №7 (2020). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6553>.

14. Пенский О.Г. Большое интервью. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=NPVjNU2BjxU>.

15. Пенский О.Г. Кто научит роботов плакать? [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.youtube.com/watch?v=w59vmeqD\\_II](https://www.youtube.com/watch?v=w59vmeqD_II).

16. Лефевр В.А. Рефлексивные процессы и управление// Международный научно практический междисциплинарный журнал. Специальный выпуск, Специальный выпуск, посвященный 70-летию В.А. Лефевра. 2006. Январь-февраль. №1. Т.6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.reflexion.ru/Library/J2006\\_1.pdf](http://www.reflexion.ru/Library/J2006_1.pdf).

17. Лефевр В. Рефлексия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://berezkin.info/wp-content/uploads/2016/08/Lefevr-refleksia-2003.pdf>.

18. Pensky O. Intelligent Control and Automation. [Электронный ресурс].

19. Фиговский О.Л., Пенский О.Г. Люди и роботы. М.: изд-во РУДН. 2021. 368 с. [Электронный ресурс].

20. Студентов МГУ обязали проходить курс по искусственному интеллекту. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/613b602d9a79476242746221>.

21. Новостная лента сайта ПГНИУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.psu.ru/news>.

22. Медведев Ю. защитить аспиранта. Российская газета. 25.05.2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rg.ru/2021/05/25/pochemu-tolko-1-iz-10-molodyh-uchenyh-dohodit-do-dissertacii.html>.

23. Петрунин Ю.Ю. Искусственный интеллект как феномен современной культуры- <https://iphras.ru/uplfile/ai/petrinin.pdf>.

## References

1. Modeling and forecasting of global processes: limits of growth in the XXI century. Report of the Club of Rome 16.04.2021. [Electronic resource].

2. Technology forecast for 100 years from Raymond Kurzweil. Electronic resource]. Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=b1RZ7fQb68U>.
3. Laws of development of technical systems. Textbook TRIZ. [Electronic resource] Matsig E. Think like a bot // Rossiyskaya Gazeta. 02.05.2018.
4. Matsig E. Think like a bot // Rossiyskaya Gazeta. 02.05.2018.
5. Figovsky O., Pensky O. Combat robots of the civilization of Earthlings// Science and life of Israel. [electronic resource]. Access mode: <http://nizinev.co.il/novosti-nauki/boevye-roboty-civilizacii-zemlyan.html>.
5. Figovsky O., Pensky O. Drones - world directions of development // Science and life of Israel. [electronic resource]. Access mode: <http://nizinev.co.il/nauka/tehnicheskije-nauki/drony-mirovye-napravleniya-razvitiya.html>.
7. Serdyukova M. Israeli engineers have created an artificial intelligence generating hypotheses. 21.08.2021. [electronic resource].
8. Volkova V.O., Maslov V.M., Sosnina E.N., Shetulova E.D., Shirshin G.A. Philosophy of science: post-eclectic development strategies. N.Novgorod: publishing house of NSTU. 2015. 132 p.
9. Gurevich G.S., Pensky O.G. Mathematical modeling of processes of motion of a material point emanating from a central forcefield// German International Journal of Modern Science No. 17, 2021. P. 43-53.
10. The Faculty of Mechanics and Mathematics became a participant in a large publishing project of Oxford University. [electronic resource].
11. Donetsk students will be taught to model emotional robots. [electronic resource]. Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=qg1ZiDE9G8I>.
12. Pensky O.G. Mathematical models of digital doubles: a textbook. Perm: publishinghouseof PGNIU. 2019. 153 p.
13. Figovsky O.L. On the scientific priority of Perm scientists in modeling the «psychology» of human digital doubles// Engineering Bulletin of the Don, No. 7 (2020). [electronic resource]. Access mode: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6553>.

14. Pensky O.G. Big interview. [electronic resource]. Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=NPVjNU2BjxU>.

15. Pensky O.G. Who will teach robots to cry? [electronic resource]. Access mode: [https://www.youtube.com/watch?v=w59vmeqD\\_II](https://www.youtube.com/watch?v=w59vmeqD_II).

16. Lefevre V.A. Reflexive processes and management// International scientific and practical interdisciplinary journal. Special Issue, Special issue dedicated to the 70th anniversary of V.A. Lefevre. 2006. January-February. No. 1. Vol.6. [Electronic resource]. Access mode: [http://www.reflexion.ru/Library/J2006\\_1.pdf](http://www.reflexion.ru/Library/J2006_1.pdf).

17. Lefebvre V. Reflection. [electronic resource]. Access mode: <http://berezkin.info/wp-content/uploads/2016/08/Lefevr-refleksia-2003.pdf>.

18. Pensky O. Intelligent Control and Automation. [electronic resource].

19. Figovsky O.L., Pensky O.G. People and robots. M.: publishing house of RUDN. 2021. 368 p. [Electronic resource].

20. MSU students were required to take a course on artificial intelligence. [electronic resource]. Access mode: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/613b602d9a79476242746221>.

21. News feed of the PSNIU website. [electronic resource]. Access mode: <http://www.psu.ru/news>.

22. Medvedev Yu. to protect a graduate student. Rossiyskaya Gazeta. 25.05.2021. [Electronic resource]. Access mode: <https://rg.ru/2021/05/25/pochemu-tolko-1-iz-10-molodyh-uchenyh-dohodit-do-dissertacii.html>.

23. Yu.Yu. Petrunin Artificial Intelligence as a phenomenon of modern culture- <https://iphras.ru/uplfile/ai/petrunin.pdf>.

---

**Фиговский Олег Львович** – д-р техн. наук, специалист в области создания новых композиционных материалов, Академик ЕАС, РИА и РААСН, почётный доктор КНИТУ, почётный профессор КГТУ, ВГАСУ и WSG.

ПЕРСОНАЛИИ

**Памяти профессора Болдырева Александра Михайловича**



**20.09.1932–28.10.2021**

28 октября 2021 года на 90-ом году жизни скоропостижно скончался в результате болезни выдающийся человек, заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник ВПО России, Почетный работник науки и техники РФ, советник при ректорате, доктор технических наук, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций, член-корреспондент Российской Академии архитектуры и строительных наук Болдырев Александр Михайлович. Всю свою жизнь он посвятил кропотливому труду на благо своей страны. Родился Александр Михайлович 20 сентября 1932 года в селе Елань-Колено Воронежской области, окончил Московский авиационный технологический институт по специальности «Технология сварочного производства». Окончил аспирантуру МАТИ. Работал старшим преподавателем, доцентом, зам. декана, деканом факультета (ВПИ). В 1978 г. в МВТУ им. Н.Э. Баумана защитил докторскую диссертацию на тему «Управление кристаллизацией металла шва при сварке плавлением», в ученой степени д-ра техн. наук утвержден ВАК 4 мая 1979 г. В ноябре 1977 г.

был избран зав. кафедрой сварки ВПИ. В ноябре 1979 г. утвержден в звании профессора.

В 1982 г. был назначен ректором ВИСИ. В 2002 г. был освобожден от занимаемой должности ректора ВГАСУ и переведен на должность советника ректора. С 01.09.2003 г. переведен на должность заведующего кафедрой металлических конструкций и сварки в строительстве. В 2008 г. утвержден приказом Федерального агентства по образованию в должности президента Воронежского ГАСУ. В последнее время работал советником ректора и профессором на кафедре металлических и деревянных конструкций.

Научные интересы Болдырева А.М. были связаны с проблемами повышения качества и надежности сварных соединений деталей машин и строительных конструкций путем воздействия на процессы формирования структуры шва и околошовной зоны. Под его личным руководством были подготовлены многие выпускники, ставшие ведущими строителями не только у нас, но и за рубежом. Он был руководителем и консультантом 11 кандидатских и 3 докторских защищенных диссертаций.

Болдырев А.М. теоретически обосновал и реализовал новое научное направление – управление формированием структуры сварных соединений с помощью периодических электромагнитных и тепловых импульсных воздействий на сварное соединение в процессе сварки. Разработанные им новые технологические процессы позволили повысить прочностные и эксплуатационные качества, а также долговечность и надежность сварных конструкций.

Болдырев А.М. является автором более 180 научных печатных работ, 20 авторских свидетельств и патентов, 5 монографий, 1 учебника, рекомендованного Министерством образования РФ для строительных вузов, 9 учебно-методических пособий.

Болдырев А.М. внес существенный вклад в повышение качества подготовки научно-педагогических и инженерных кадров, он создал кафедру сварки и организовал подготовку инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Под его руководством впервые разработан

и утвержден Министерством образования Российской Федерации учебный план специальности «Промышленное и гражданское строительство» со специализацией «Сварка в строительстве», и впервые в стране с 1986-1987 учебного года организована подготовка и выпущены 154 специалиста промышленного и гражданского строительства по этой специализации.

Результаты научных разработок, выполненных под руководством профессора Болдырева А.М., внедрены в практику, используются при изготовлении сварных конструкций в мостостроении, машиностроении, авиа- и ракетостроении. В последнее время профессор Болдырев А.М. руководил крупными научно-исследовательскими работами в области сварки. Под его началом разрабатывались теоретические основы физико-химического взаимодействия разнородных материалов с целью создания новых композиционных материалов.

Благодарные ученики, коллеги по работе, преподаватели и сотрудники университета, все, знавшие этого замечательного человека, сохраняют о нём светлую память.

*Проскурин Д.К., Панфилов Д.В., Свентиков А.А., Рудаков О.Б.*

**Научное издание**

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

**Выпуск № 4 (31), 2021**

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 20.12.2021.  
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.  
Усл. печ. л. 16,9. Уч.-изд. л. 8,9.  
Тираж 500 экз. Заказ № 213  
Цена свободная*

---

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84