



ISSN 2587-9006

Воронежский государственный
технический университет

Химия, физика и механика
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск №4 (27),2020

ISSN 2587-9006

*ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»*

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

- ХИМИЯ
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- МЕХАНИКА
- БИОФИЗИКА
- ПЕРСОНАЛИИ, ХРОНИКА

Выпуск № 4 (27), 2020

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 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 профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р техн. наук, проф. В.В. Белов (г. Тверь, ТвГТУ); д-р техн. наук, проф. С.С. Глазков (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИИ); 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. 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, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, Воронежский филиал 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); д-р хим. наук, проф. Г.В. Славинская (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); д-р физ.-мат. наук, проф. М.В. Шитикова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. В.П. Ярцев (г. Тамбов, ТГТУ).

В издании публикуются результаты научных исследований и производственного опыта сотрудников ВГТУ и других образовательных, научных, научно-производственных организаций по проблемам химии и физики строительных и технических материалов; химической технологии и физико-химических методов диагностики, контроля качества и безопасности материалов, применяющихся в строительстве и технике; по технософной безопасности. Номер посвящен 90-летию ВИСИ-ВГАСА-ВГАСУ-ВГТУ.

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

Перепечатка материалов журнала допускается только с разрешения 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», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

Шабловский Я.О.

Магнитная обработка питьевой и технологической воды..... 4

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Фиговский О.Л., Штейнбок А.З., Шуваев Д.И., Кукина О.Б., Кукин Л.А.

Инновации в отрасли строительных материалов. Часть 1..... 25

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..... 36

Макушина Ю.В., Шмитько Е.И., Белькова Н.А.

Пути оптимизации качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки..... 50

Белов В.В.

Формовочные свойства увлажненных керамических пресс-порошков..... 66

МЕХАНИКА

Трещев А.А., Кузнецова В.О.

Воздействие коррозионной водородосодержащей среды и анализ напряжённого состояния круговой оболочки цилиндрической формы из титанового сплава..... 79

БИОФИЗИКА

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

Динамическая электростимуляция зрительной коры как способ вернуть зрение..... 94

ПЕРСОНАЛИИ, ХРОНИКА

Рудаков О.Б.

История преподавания химии в ВИСИ-ВГАСА-ВГАСУ-ВГТУ..... 112

Шалимов Ю.Н.

Взгляд на историю развития кафедры общей химии Воронежского политехнического института..... 126

Перцев В.Т., Панфилов Д.В., Рудаков О.Б., Юмашева Е.И.

Баженов Юрий Михайлович – основатель современной Российской научной школы бетоноведения..... 136

УДК 544.32:66.086

МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА ПИТЬЕВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Я.О. Шабловский

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48*

*Адрес для переписки: Шабловский Ярослав Олегович,
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Магнитная обработка водных систем с начала 1960 гг. широко применялась в отечественной строительной отрасли и в теплоэнергетике. В настоящее время принято считать, что этот метод неэффективен, но непредвзятый анализ огромного количества доступных результатов испытаний магнитной обработки показывает: констатируя неэффективность, в действительности подразумевают не отсутствие технического результата, а его нестабильность. Это неизбежно, поскольку соответствующие испытания – как успешные, так и неудачные – проводились «наугад». Наш анализ показал, что внешне простой эффект омагничивания имеет нетривиальную физико-химическую природу и обусловлен специфическими магнитохимическими и кристаллохимическими свойствами карбонатной подсистемы природной воды. Выявление этих фундаментальных закономерностей позволило дать практические рекомендации по осуществлению магнитной обработки водных систем. Особое внимание уделено омагничиванию водно-цементных смесей.

Ключевые слова: жёсткость воды, временная жёсткость, накипь, магнитная обработка, магнитное поле, кальцит, арагонит, фатерит, магнезит, цементные смеси

MAGNETIC TREATMENT FOR FRESHWATER SUPPLY AND FOR TECHNOLOGY

Ya.O. Shablovsky

*Gomel State Technical University,
Belorussia, 246746, Gomel, prosp. Oktiabria, 84*

*Corresponding author: Shablovsky Yaroslav Olegovich,
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Magnetic treatment of water has been known since the 1960s but is still the subject of much debate nowadays. This is largely due to lack of reliable scientific basis for magnetic water treatment. Despite the evidence of its efficiency the method is still being regarded with much skepticism. The common opinion is that passing water through a magnetic field could somehow influence its properties only if water could acquire long-lasting magnetically-induced changes of its properties. In the absence of any plausible physical mechanism for such acquirement no consensus has been reached yet as to the treatment's mode of operation which is conventionally regarded as enigmatic. Its trials were hit-or-miss that in its turn led to the method being discredited. To correct this situation we start with revealing the chemical nature of the phenomenon under discussion. The crystal structure and crystal morphology of the carbonate components of natural water are taken into account. Hereafter we proceed with analyzing qualitative laws of scale forming in a magnetic field and finish with elaborating practical recommendations for carrying out magnetic water treatment. Special attention is paid to magnetic water treatment to enhance the workability and compressive strength of concrete.

Keywords: freshwater, water hardness, temporary hardness, scale, magnetic treatment, magnetic field, calcite, aragonite, vaterite, magnesite, cement mixtures

Введение. Магнитная обработка водных систем применяется столь широко и столь эффективно, что некоторые авторы [1] даже расценивают это как довод против достоверности публикуемых сообщений об успешной апробации

этого метода. Некоторые сообщения подобного рода действительно выглядят фантастическими,^{*)} однако у противников магнитной обработки водных систем имеется и более серьёзное объективное возражение [4] – нестабильность технического результата такой обработки.

Наибольшее практическое значение имеет магнитная обработка жидкости затворения цементных систем. Именно для таких систем, с одной стороны, получены наиболее надёжные результаты испытаний магнитной обработки [5-9], а с другой стороны, наиболее актуально выяснение природы обсуждаемого эффекта.

Попытки оценить его количественно неизменно приводят к парадоксальному выводу [10]: для достижения технически значимого результата требуются недостижимо сильные магнитные поля. Между тем, практика магнитной обработки наглядно демонстрирует возможность не только эффективно управлять процессами гидратации и структурообразования цементных систем [7-9], но и интенсифицировать очистку сточных вод [11], а также осуществлять высокоэффективную безреагентную водоподготовку.

Магнитная обработка питьевой воды, проводимая с целью уменьшения отложений накипи на водонагревательных поверхностях, вызывает у скептиков особое недоверие. Испытания демонстрируют явное уменьшение накипеобразования в омагничиваемых водонагревателях [12-14], но наблюдаемый эффект не поддаётся объяснению, т.к. отчётливо выраженное противонакипное действие магнитного поля доказывают опыты, радикально различающиеся гидродинамическими особенностями обработки, её временным режимом, конструкцией установки, а также наличием/отсутствием в воде примесей железа в какой-либо форме. При этом имеют место значительные количественные различия накипеобразования при повторении испытания спустя длительный промежуток времени в неизменных (по мнению экспериментаторов) условиях [4]. Более того, в ходе продолжительных испытаний серийно выпускаемых водоо-

^{*)} Например, авторы [2] анонсировали апробацию технологии, которая, мягко говоря, не вполне согласуется с общепринятыми представлениями [3] о качестве пищевого этанола и путях его улучшения.

магничивающих установок обычно обнаруживается постепенное ослабление их эффективности [4, 14], а в отдельных случаях даже отмечалась «сезонность» – отсутствие технического результата магнитной обработки водопроводной воды во время и после таяния снега [15]. У многих авторов [1, 4, 16] это создаёт впечатление отсутствия у обсуждаемого эффекта каких-либо устойчивых закономерностей, тогда как с формальной точки зрения подобные факты лишь побуждают согласиться с мнением [17] о необходимости корректировок традиционного подхода, применяемого при расчётах электромагнитных эффектов в веществе.

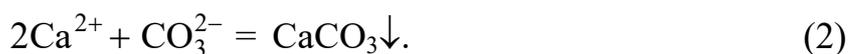
С этой целью в нашей предшествующей работе [18] был выполнен общий термодинамический анализ магнитохимических эффектов в гетерофазных реакционных смесях. В настоящей работе, опираясь на результаты [18], мы выявим химическую природу воздействия магнитного поля на водные системы и дадим практические рекомендации по осуществлению магнитной обработки таких систем с стабильно высоким техническим результатом.

Противонакипное омагничивание воды

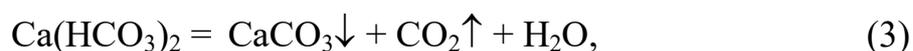
При нагревании природной воды содержащиеся в ней гидрокарбонат-ионы распадаются [19]:



В растворе накапливаются карбонат-ионы, вступающие во взаимодействие с ионами кальция:



Итоговый процесс



наиболее интенсивен при температурах $50 \div 75^\circ\text{C}$. При этом на его протекание существенно влияет повышение растворимости карбонатов с ростом концентрации c_{CO_2} углекислого газа в водном растворе (т.е. с ростом парциального давления p_{CO_2}) вследствие изменения величины рН раствора. Обработка данных [20] при $-9,75 \leq \log c_{\text{CO}_2} \leq -1$ дала следующие эмпирические зависимости:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 1 + 6,5136[-2 - \log c_{\text{CO}_2}]^{1/4}, \\ \text{pH} &= \frac{1}{0.1026 + 0.008481 p_{\text{CO}_2}^{0.2375}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\{p_{\text{CO}_2}\} = \text{Па}$.

Ранее уже отмечалось [18, 21], что поведение неизотермической водной системы в магнитном поле определяется специфическими магнитохимическими свойствами её карбонатной подсистемы. При наличии магнитного поля карбонат кальция, выделяющийся в ходе процесса (3), кристаллизуется не в форме кальцита (пр. гр. $R\bar{3}c$), образующего трудноудаляемую накипь на поверхностях, а в форме арагонита (пр. гр. $Pnam$), остающегося во взвешенном состоянии либо образующего легкоудаляемый шлам. При стандартном давлении и температурах $273^\circ\text{K} < T < 373^\circ\text{K}$ термодинамически устойчивой модификацией CaCO_3 является кальцит: $\Delta G_c < \Delta G_a$, где ΔG_c – молярная энергия Гиббса образования кальцита, ΔG_a – молярная энергия Гиббса образования арагонита. Наш расчёт, опирающийся на результаты [18, 21], показал следующее. При нагревании воды в обычных условиях термодинамический запрет кристаллизации арагонита вместо кальцита усиливается, т.к. с ростом температуры отрицательная величина $\delta G = \Delta G_c - \Delta G_a$ возрастает по модулю. Однако это возрастание выражено очень слабо, благодаря чему не требует температурной корректировки величина h_a напряжённости постоянного магнитного поля, снимающего термодинамический запрет образования арагонита: $h_a \sim 5 \text{ кЭ}$, что соответствует магнитной индукции $\sim 0.5 \text{ Тл}$.

Противонакипный эффект магнитной обработки воды обусловлен сочетанием трёх факторов.

Определяющим является магнитоиндуцированное снятие термодинамического запрета кристаллизации арагонитовой модификации CaCO_3 в карбонатном растворе. Действие этого фактора усиливается тем, что, во-первых, по сравнению с кальцитовой модификацией структура арагонитовой модификации обладает более высоким кристаллохимическим приоритетом $\{P_{\text{nam}}: R\bar{3}c = 4.94:1\}$, а во-вторых, структуры арагонита и кальцита топотактически несопряжимо [22].

Арагонитовая модификация CaCO_3 , имеющая по сравнению с кальцитом кристаллохимическое преимущество, при омагничивании приобретает решающее – термодинамическое – преимущество. Благодаря этому омагничивание воды, начатое одновременно с её нагревом, обеспечивает формирование зародышей арагонита, предопределяя весь дальнейший процесс образования карбонатного осадка. А именно, при последующем нагреве природной воды вне магнитного поля продолжается осаждение CaCO_3 в форме арагонита, т. к. отрицательность температурного коэффициента растворимости карбонатов стабилизирует зародыши арагонита, а кристаллизация кальцита на этих зародышах невозможна в силу топотактической несопряжимости структур кальцита и арагонита.

Противонакипный эффект в обработанной воде сохраняется в течение промежутка времени, необходимого для растворения зародышей арагонита, образовавшихся в ходе омагничивания воды. На практике это проявляется постепенным ослаблением противонакипного эффекта в воде, предварительно обработанной магнитным полем, а затем выдержанной вне этого поля без нагрева.

Противонакипный эффект омагничивания может ослабляться избыточным содержанием в воде органических примесей.^{*)} Их наличие способно иска-

^{*)} В пресной воде открытых источников присутствуют гуминовые кислоты и их соли, содержание которых значительно повышается во время половодья. При несовершенной очистке воды из таких источников проявляется упомянутая выше «сезонность» эффекта омагничивания.

жать ход кристаллизации CaCO_3 при нагревании воды, вызывая выделение карбоната кальция в форме фатерита.

Эта модификация CaCO_3 существует только как биоминерал и в свободном состоянии неустойчива: выделенный из биокерамического сырья фатерит необратимо превращается в кальцит [23]. В то же время, по сравнению с другими модификациями карбоната кальция фатерит (пр. гр. $R\bar{6}_3/mmc$) имеет исключительно высокий кристаллохимический приоритет:

$$R\bar{6}_3/mmc : Pnam : R\bar{3}c = 38.17 : 4.94 : 1. \quad (5)$$

«Кристаллохимическая целесообразность» образования фатеритовой модификации CaCO_3 подтверждена экспериментально: доказано [24], что карбонат кальция может кристаллизоваться в форме фатерита при наличии в растворе примесей органических соединений. В свете вышесказанного очевидно, что омагничивание раствора усилит эту тенденцию. Вместе с тем, после прекращения омагничивания доминирующим фактором окажется мероздричность термодинамически устойчивого кальцита по отношению к термодинамически неустойчивому фатериту, предопределяющая трансформацию фатерита в кальцит. Таким образом, при наличии органических примесей в воде её омагничивание не подавит, а лишь замедлит образование кальцитовых отложений: возникающий на начальной стадии процесса легкоудаляемый осадок лепестковых микрокристаллов фатерита постепенно формирует прочный поликристаллический слой кальцита (см. рис. 1).

Природные воды могут содержать большое количество ионов Mg^{2+} . В таком случае противонакипное омагничивание воды целесообразно осуществлять на всём протяжении её нагрева вплоть до температур $\sim 90^\circ\text{C}$.

Во-первых, изоструктурный кальциту магнезит MgCO_3 (пр. гр. $R\bar{3}c$) имеет по сравнению с арагонитом пониженный кристаллохимический приоритет {см. (5)}. Преимущественное протекание в магнитном поле реакции (2) с обра-

зованием арагонита обеспечивает интенсивное связывание ионов CO_3^{2-} арагонитовым шламом и значительно снижает количество карбонат-ионов, способных образовывать магнезитовую накипь.

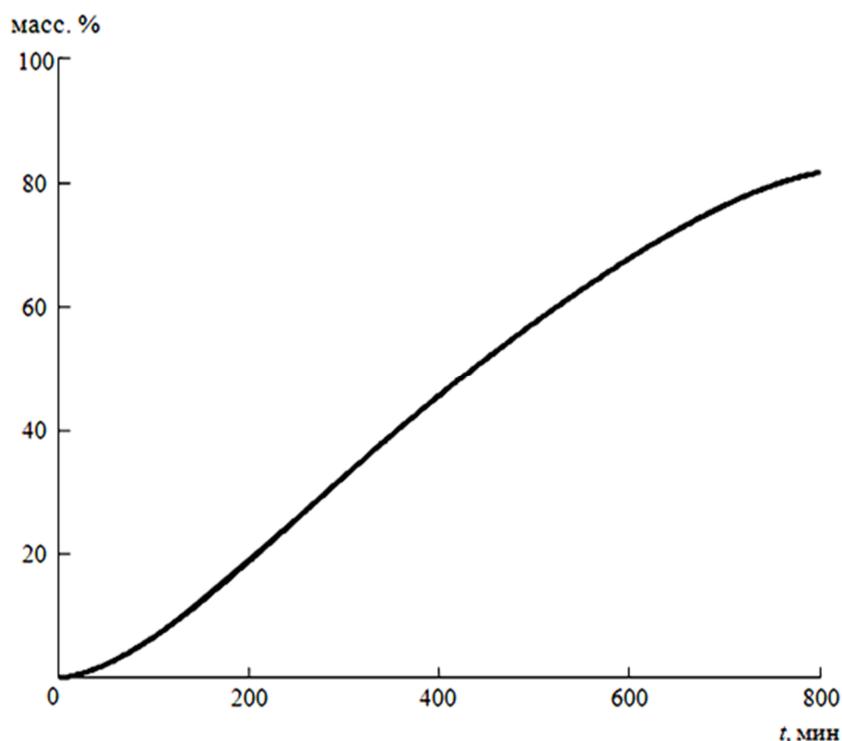
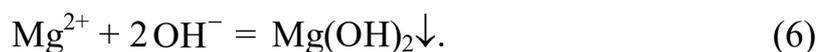


Рис. 1. Кинетика трансформации фатерита в кальцит (по данным [23])

Во-вторых, осаждающимся из карбонатного раствора кристаллам магнезита свойственно менять габитус при изменении pH раствора [25]. Обусловленное процессом (1) повышение давления p_{CO_2} уменьшает pH раствора {см. (4)}, в результате чего вместо ромбоэдрических кристаллов, образующих прочные отложения магнезита на поверхностях, в омагничиваемой воде возникают рыхлые агрегаты иглоподобных кристаллов MgCO_3 . Прямое наблюдение такого магнитоиндуцированного изменения габитуса MgCO_3 описано в работе [26].

В-третьих, в горячей воде существенный вклад в накипеобразование вносят отложения брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$: при температурах от 82°C вторичному процессу (2) обычно сопутствует процесс



В омагничиваемой с начала нагрева воде процесс (6) оказывается подавлен, т. к. соответствующий ему первичный процесс высокотемпературного разложения гидрокарбонат-иона



подавляется смещением его равновесия влево благодаря созданному предшествующим низкотемпературным процессом (1) повышенному давлению p_{CO_2} и вызванному этим повышением уменьшению рН раствора.

Подавление отложений брусита имеет особое практическое значение, поскольку речь идёт о некарбонатной накипи, тяжело поддающейся удалению с водонагревательных поверхностей. Для удаления карбонатных отложений можно использовать те же магнитохимические эффекты, которые выше были рассмотрены в контексте предотвращения образования этих отложений.*)

Такая возможность обеспечивается тем, что общее количество содержащегося в воде углекислого газа имеет базовую и реактивную составляющие. Реактивная составляющая – результат термического разложения гидрокарбонатов {реакции (1), (7)}, а базовая составляющая изначально присутствует в воде наряду с другими растворёнными в ней газами (O_2 , N_2 , H_2S , CH_4 и т. д.). Базовое содержание CO_2 в воде изменяется вслед за изменениями атмосферного давления, поэтому при длительных временных промежутках между опытами количественные оценки накипеобразования в омагниченной воде неизбежно различаются. Реактивная составляющая p_{CO_2} соразмерна карбонатной жёсткости обрабатываемой воды (рис. 2), тогда как базовую составляющую легко повысить нагнетанием CO_2 в воду. Благодаря изменению рН раствора {формулы (4)} это

*) Возможность удаления накипных отложений путём омагничивания котловой воды была экспериментально доказана ещё в 70-х г.г. прошлого века [27].

интенсифицирует растворение карбонатных отложений, т. е. насыщение раствора ионами CO_3^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Последующий нагрев раствора в магнитном поле будет сопровождаться описанными выше явлениями – образованием арагонитового и магнезитового шлама. Такую обработку целесообразно проводить циклично, чередуя насыщение холодной воды углекислым газом с её последующим прогревом в замкнутом объёме в постоянном магнитном поле; каждый цикл обработки трансформирует карбонатные отложения на водонагревательных поверхностях в высокодисперсный шлам.

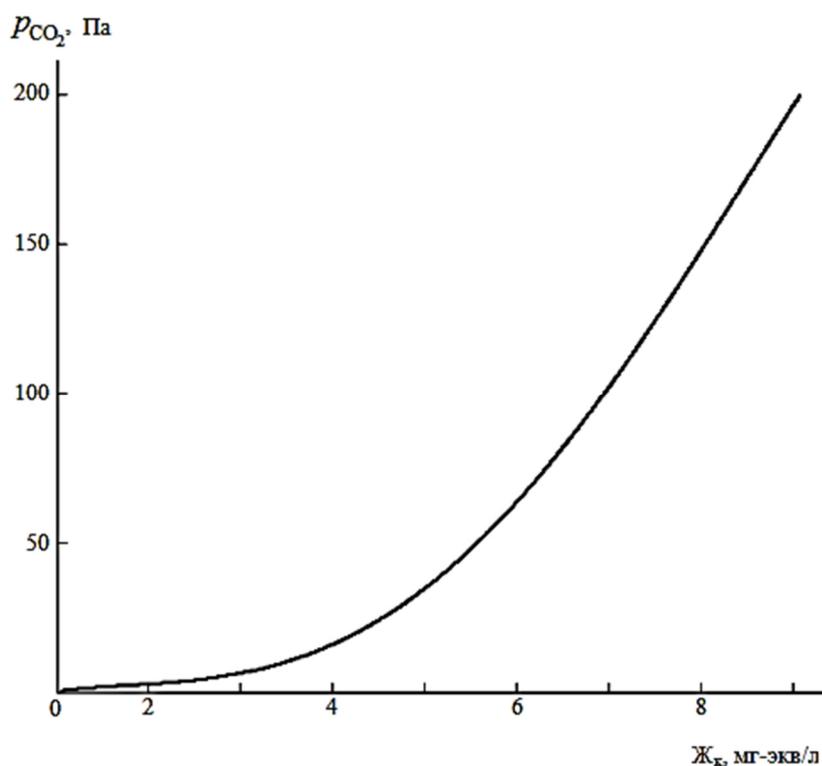


Рис. 2. Зависимость парциального давления углекислого газа в природной воде от её карбонатной жёсткости при стандартных условиях (по данным [20])

Действие магнитного поля при обработке воды обеспечивается магнитондуцированным приращением молярной энергии Гиббса, которое создаётся потенциальной энергией консервативных сил [18]. По этой причине обработка воды переменным магнитным полем тем менее эффективна, чем больше частота поля. Конструктивное исполнение омагничивающей установки, позволяющей обрабатывать воду однородным постоянным магнитным полем, представ-

лено в работе [21]. Однородность поля при магнитной обработке воды обязательна. В противном случае, т. е. при наличии градиента магнитного поля, на его границах будут скапливаться микрокристаллы окислов железа (магнетита и т.п.), перекрывая омагничиваемое сечение трубы.

Эти скопления очень часто обнаруживались при вскрытии типовых установок для магнитной обработки воды после длительных испытаний [28, с. 36] и существенно осложняли водоподготовку, что и предопределило постепенно сформировавшееся стойкое убеждение в нецелесообразности противонакипного омагничивания. Между тем, упомянутый магнитноградиентный эффект, во-первых, легко устраняется адекватным конструктивным исполнением омагничивающей установки (см. [21]), а во-вторых, не является сугубо вредным: его можно использовать для железомарганцевой фильтрации воды.

Железомарганцевая фильтрация воды

Стандартная методика очистки воды от примесей железа основана на окислении содержащихся в воде ионов Fe^{2+} до Fe^{3+} для их последующего удаления в форме гидроксида $Fe(OH)_3$. В нейтральных и щелочных водах такое окисление можно осуществить прямой аэрацией. В то же время, при $pH < 6,8$ прямая аэрация неэффективна, что вынуждает использовать средства каталитического окисления и, соответственно, резко снижает производительность водочистки. Удаление из воды избыточного содержания марганца традиционными методами также низкопроизводительно, поскольку осуществляется путём окисления ионов Mn^{2+} до Mn^{3+} и/или Mn^{4+} с образованием нерастворимых гидроксидов в каталитических фильтрах на основе ионообменных смол.

Магнитно-градиентная железомарганцевая фильтрация заключается в пропускании воды через область неоднородного магнитного поля. Его воздействие усиливает электроотрицательность ферромагнитных и парамагнитных металлов [18], благодаря чему интенсифицируются окислительные процессы, переводящие содержащиеся в воде железо и марганец в нерастворимые окисные соединения (магнетит, гаусманнит, пиролюзит и т.д.), оседающие на границах градиентной области.

В отличие от базовой водоомагничивающей установки (см. [21]) конструктивное исполнение магнитно-градиентного железомарганцевого фильтра вариативно. Источником рабочего магнитного поля фильтра может служить любой постоянный магнит, создающий в объёме фильтра индукцию $0,25 \div 0,5$ Тл. Пространственная неоднородность рабочего поля обеспечивается наличием в этом объёме ферромагнитного наполнителя. Магнитное поле индуцирует в обрабатываемой воде окислительные реакции, ведущие к оседанию нерастворимых окисных соединений железа и марганца на поверхности зёрен ферромагнитного наполнителя. Для питьевого водоснабжения рекомендуется заполнение фильтра шариками из хромоникелевой стали 18/10 (сталь 12×18Н10). Для очистки сильно загрязнённых железом вод в качестве наполнителя можно использовать размолотую металлургическую окалину. В последнем случае при прочистке фильтра сработавший наполнитель можно размолоть, просеять и использовать повторно.

Омагничивание водно-цементных смесей

Высокая карбонатная жёсткость способна оказаться не недостатком, а достоинством воды, если речь идёт о воде для затворения цементных смесей. При этом особо высокие прочностные и эксплуатационные характеристики бетона достигаются при омагничивании цементных смесей, затворяемых такой водой.

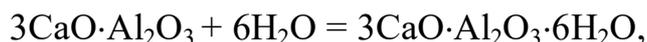
Наиболее эффективное управление формированием цементного камня обеспечивают контролируемые воздействия, усиливающие гидратацию клинкерных минералов [29]. Гидратация в водно-цементной суспензии сопровождается значительным тепловыделением, благодаря чему при воздействии магнитного поля на затворяющую цемент воду протекает процесс (3) с образованием арагонита. Ранее было показано [21], что константа скорости реакции образования арагонита существенно превосходит константу скорости реакции образования кальцита. Вследствие этого омагничивание обеспечивает интенсивное повышение p_{CO_2} в квазизамкнутых реакционных микрообъёмах водно-

цементной суспензии и в конечном итоге снижает pH водного раствора {см. (4)}.

При омагничивании воды, затворяющей портландцемент, такое магнитоиндуцированное снижение pH раствора ускоряет реакции гидратации трёхкальцевого и двухкальцевого силикатов



В результате уменьшается «отставание» кристаллизации алитовой и белитовой фаз цементного камня от гидратации трёхкальцевого алюмината



что существенно повышает однородность цементного камня, т. е. его прочность. Тот же фактор – магнитоиндуцированное снижение pH раствора – интенсифицирует гидратацию глинозёмистого цемента, ускоряя выделение аморфного гидроксида алюминия в различных основных формах и экстрагирование оксида кальция из гидратных алюминатов в воду затворения с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В свете сказанного становится понятен обнаруженный авторами [7] полиэкстремальный (волнообразный) характер зависимости прочности цементного камня от количества циклов магнитной активации воды затворения. Поскольку обрабатываемая вода находилась в свободном газообмене с атмосферным воздухом, авторы [7] зарегистрировали осцилляции, симбатные осцилляциям p_{CO_2} в воде затворения.

Выводы. 1. Эффект омагничивания природной воды обусловлен специфическими магнитохимическими и кристаллохимическими свойствами её карбонатной подсистемы.

2. Противонакипная обработка воды должна проводиться в однородном постоянном магнитном поле напряжённостью ~ 5 кЭ, что соответствует магнитной индукции ~ 0.5 Тл. Омагничивание воды должно начинаться одновременно с её нагревом. Омагничивание воды с невысоким содержанием ионов Mg^{2+} можно прекратить после её прогрева до температуры $\sim 75^\circ C$. Магнитная обработка воды с повышенным содержанием ионов Mg^{2+} должна производиться до температур $\sim 90^\circ C$.

3. Противонакипный эффект в обработанной в вышеуказанном режиме воде сохраняется в течение промежутка времени, необходимого для растворения зародышей арагонита, образовавшихся в ходе омагничивания воды. Обработке воды из открытых источников должно предшествовать предварительное удаление органических примесей.

4. Омагничивание воды не только подавляет образование твёрдых накипных отложений на водонагревательных поверхностях, но и способствует удалению уже имеющихся карбонатных отложений. Наиболее эффективно циклическое чередование насыщения холодной воды углекислым газом с её последующим прогревом в замкнутом объёме в постоянном магнитном поле. Каждый цикл обработки трансформирует карбонатные отложения на водонагревательных поверхностях в высокодисперсный шлам.

5. Для железомарганцевой фильтрации воды целесообразно её пропускание через область неоднородного магнитного поля. Источником рабочего магнитного поля фильтра может служить любой постоянный магнит, создающий в объёме фильтра индукцию $0,25 \div 0.5$ Тл. Пространственная неоднородность рабочего поля обеспечивается наличием в этом объёме ферромагнитного наполнителя. Для питьевого водоснабжения рекомендуется заполнение фильтра шариками из хромоникелевой стали 18/10 (сталь 12×18Н10). Для очистки сильно загрязнённых железом вод в качестве наполнителя можно использовать размолотую металлургическую окалину.

6. Омагничивание воды, затворяющей портландцемент, ускоряет реакции гидратации трёхкальциевого и двухкальциевого силикатов, уменьшая «отстава-

ние» кристаллизации алитовой и белитовой фаз цементного камня от гидратации трехкальциевого алюмината. Омагничивание воды, затворяющей глинозёмистый цемент, ускоряет выделение аморфного гидроксида алюминия в различных основных формах и экстрагирование оксида кальция из гидратных алюминатов в воду затворения с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Список литературы

1. Coey J. Magnetic water treatment – how might it work? // *Philosophical Magazine*. 2012. Vol. 92, № 31. P. 3857-3865.

2. Григоренко С., Попова В., Фефелов А., Боровикова Н. Применение магнитных полей для повышения качества спирта // *Продовольственная индустрия АПК*. 2012. № 3 (17). С. 18-21.

3. Рудаков О.Б., Никитина С.Ю., Кудухова И.Г. Сорбционные и ионообменные методы очистки пищевого этилового спирта и полупродуктов брагоректификации от микропримесей (обзор) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2010. Т. 10. № 3. С. 389-400.

4. Очков В. Ф. Магнитная обработка воды: история и современное состояние // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2006. № 2 (40). С. 12-17.

5. Nan S., Chea-Fang W. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25, № 7. P. 681-688.

6. Soto-Bernal J., Gonzalez-Mota R., Rosales-Candelas J. Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 934195-1–934195-9.

7. Роль цикловой магнитной обработки воды затворения в управлении процессами гидратации и структурообразования цементных систем / В.Н. Сафронов [и др.] // *Вестник Томского архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4. С. 135-148.

8. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть II. Структурные характеристики минералов в ранние сроки твердения цементного камня при использовании магнитно-активированной воды затворения / Ю.А. Абзаев [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 150-159.

9. Комбинированная обработка жидкости затворения цементных систем / Ю.С. Саркисов [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 2. С. 163-170.

10. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть I. Теоретические предпосылки влияния магнитного поля на физико-химические процессы / Н.П. Горленко [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 134-150.

11. Давыдова Е.Г. Анализ качества природной воды водоёма, находящегося вблизи рудодобывающего предприятия // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1 (49). С. 37-45.

12. Chibowski E. Szcześ A. Magnetic water treatment – A review of the latest approaches // Chemosphere. 2018. Vol. 203, № 1. P. 54-67.

13. Lin L., Pei X. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems // NPJ Clean Water. 2020. Vol. 3, № 1. P. 25-1–25-20.

14. Latva M. Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system / M. Latva [et al] // Journal of Water Process Engineering. 2016. Vol. 9, № 1. P. 215-224.

15. Бондаренко Н.Ф., Гах Е.З. Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 152 с.

16. Baker J.S., Judd S.J. Magnetic amelioration of scale formation // Water Research. 1996. Vol. 30, № 2. P. 247-260.

17. Павлов Б.Л., Никишина А.И., Давыдова Е.Г. Двухкомпонентная модель вырожденного идеального электронного газа // Химия, физика и механика материалов. 2016. № 2 (13). С 100-108.

18. Шабловский Я.О. Магнитное управление химическими свойствами неферромагнитных материалов // Химия, физика и механика материалов. 2019. № 4 (23). С. 93-109.
19. Morse J. W. The kinetics of calcium carbonate dissolution and precipitation // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 1983. Vol. 11, № 1. P. 227-264.
20. Минаев А.Н., Кашинский В.И., Лысенко Л.В. Термическая технология высокоминерализованных вод. Под ред. О.И. Мартыновой. Москва, Изд-во ВИНТИ РАН, 1992. 414 с.
21. Шабловский Я.О. Преемственность структур при топохимическом синтезе кристаллических материалов // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 2 (25). С. 48-78.
22. Шабловский Я.О. Кристаллохимия реакций на поверхности твёрдой фазы // Химия, физика и технология поверхности. 2020. Т. 11. № 3. С. 330-346.
23. Nehrke G. Calciet precipitatie uit een waterige oplossing // Geologica Ultraiectina. 2007. Vol. 273. S. 75.
24. Конопаска-Łyskawa D. Precipitation and transformation of vaterite calcium carbonate in the presence of some organic solvents // Materials. 2020. Vol. 13, № 12. P. 2742-1–2742-14.
25. Apriani M., Hadi W., Masduqi A. Synthesis of magnesium carbonate polymorphs from Indonesia traditional salt production wastewater // EnvironmentAsia. 2018. Vol. 11, № 2. P. 140-148.
26. Саркисов Ю. С. Температурные отклики воды и водных растворов на внешнее воздействие магнитным полем / Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко, В. Н. Сафронов, С. А. Кугаевская // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2015. № 2. С. 20-29.
27. Тихомиров Г.И. Разрушение накипных отложений в паровых котлах при обработке питательной воды постоянным магнитным полем // Вопросы теории магнитной обработки воды и водных систем: Сб. науч. тр. / Под ред. В.И. Классена. М.: Цветметинформация, 1971. С. 283-288.

28. Тихомиров, Г. И. Технологии обработки воды на морских судах. Владивосток: Морской гос. ун-т, 2013. 159 с.

29. Перцев В.Т., Козодаев С.П. Химизация и наномодифицирование – современный путь совершенствования технологии цементных систем // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 1 (24). С. 121-130.

References

1. Coey J. Magnetic water treatment – how might it work? // *Philosophical Magazine*. 2012. Vol. 92, no. 31. P. 3857-3865.

2. Grigorenko S., Popova V., Fefelov A., Borovikova N. [Applying magnetic fields to enhance the quality of alcohol]. *Agricultural industry*, 2012, no. 3 (17). P. 18-21. (in Russian).

3. Rudakov, O.B., Nikitina, S.J., Kudukhova, I.G. Sorption and ion-exchange methods of purification of food ethanol and intermediate products of span-rectification from microimpurities (A Review) // *Sorption and chromatographic processes*, 2010, vol. 10, no. 3. P. 389-400.

4. Ochkov V.F. [Magnetic water treatment: history and state of the art]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 2 (40). P. 12-17. (in Russian).

5. Nan S., Chea-Fang W. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25, № 7. P. 681-688.

6. Soto-Bernal J., Gonzalez-Mota R., Rosales-Candelas J. Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 934195-1–934195-9.

7. Safronov V.N., Gorlenko N.P., Sarkisov Ju.S., Abzaev Ju.A., Kugaevskaja S.N. [The role of magnetic water processing for controlling hydration and structure forming in cement systems]. *Journal of construction and architecture*, 2014, no. 4. P. 135-148. (in Russian).

8. Abzaev Ju.A., Safronov V.N., Sarkisov Ju.S., Gorlenko N.P., Kugaevskaja S.N. [Magnetic field as control for the structure and properties of cement systems. Part 2. Structural properties of minerals at cement brick early hardening using mixing water magnetic activation]. *Journal of construction and architecture*, 2015, no. 4. P. 150-159. (in Russian).
9. Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P., Rubanov A.A., Vergasov V.V. [Combined processing of mixing water for cement systems]. *Journal of construction and architecture*, 2018, vol. 20, no. 2. P. 163-170. (in Russian).
10. Gorlenko N.P., Safronov V.N., Abzaev Y.A., Sarkisov Y.S., Kugaevskaya S.N., Ermilova T.A. [Magnetic field as factor of control for structure and properties of cement systems. Part 1. Theoretical prerequisites for magnetic effect on physico-chemical processes], *Journal of construction and architecture*, 2015, no. 3. P. 134-150. (in Russian).
11. Davydova E.G. [Analysis of the quality of natural water of a reservoir near an ore extraction plant]. *Scientific journal of construction and architecture*, 2018, no. 1 (49). P. 37-45. (in Russian).
12. Chibowski E. Szcześ A. Magnetic water treatment – A review of the latest approaches // *Chemosphere*. 2018. Vol. 203, № 1. P. 54-67.
13. Lin L. Pei X. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems // *NPJ Clean Water*. 2020. Vol. 3, № 1. P. 25-1–25-20.
14. Latva, M. Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system / M. Latva [et al] // *Journal of Water Process Engineering*. 2016. Vol. 9, № 1. P. 215-224.
15. Bondarenko N.F., Gah E.Z. *Elektromagnitnye yavleniya v prirodnyh vodah*. L.: Gidrometeoizdat, 1984. (in Russian).
16. Baker J.S., Judd S.J. Magnetic amelioration of scale formation // *Water Research*. 1996. Vol. 30, № 2. P. 247-260.

17. Pavlov B.L., Nikishina A.I., Davydova E.G. [Two-component model of a degenerate ideal electron gas]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2016. no. 2 (13). С 100-108. (in Russian).
18. Shablovsky Ya.O. [Magnetic controlling chemical properties of non-ferromagnetic materials]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials]. 2019, no. 4. P. 93-109.
19. Morse J.W. The kinetics of calcium carbonate dissolution and precipitation // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 1983. Vol. 11, № 1. P. 227-264.
20. Minaev A.N., Kashinskij V.I., Lysenko L.V. *Termicheskaya tekhnologiya vysokomineralizovannyh vod*. Moskva, Izd-vo VINITI RAN, 1992. (in Russian).
21. Shablovsky Ya.O. [Succession of structures at topochemical synthesis of crystalline materials]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials]. 2020, no. 2. P. 48-78. (in Russian).
22. Shablovsky Ya.O. Crystal chemistry of reactions on solid surfaces // *Chemistry, Physics & Technology of Surface*. 2020, vol. 11, no 3. P. 330-346.
23. Nehrke G. Calciet precipitatie uit een waterige oplossing // *Geologica Ultraiectina*. 2007. Vol. 273. 75 p.
24. Konopacka-Łyskawa D. Precipitation and transformation of vaterite calcium carbonate in the presence of some organic solvents // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 12. P. 2742-1–2742-14.
25. Apriani M., Hadi W., Masduqi A. Synthesis of magnesium carbonate polymorphs from Indonesia traditional salt production wastewater // *EnvironmentAsia*. 2018. Vol. 11, № 2. P. 140-148.
26. Sarkisov U.S., Gorlenko N.P., Safronov V.N., Kugaevskaya S.A. [Thermal responses of water and water solutions on the external magnetic field]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Himiya*, 2015, no. 2. P. 20-29. (in Russian).
27. Tihomirov G.I. [Razrushenie nakipnyh otlozhenij v parovyh kotlah pri obrabotke pitatel'noj vody postojannym magnitnym polem] *Voprosy teorii magnitnoj*

obrabotki vody i vodnyh sistem: Sb. nauch. tr. / Pod red. V.I. Klassena. M.: Cvetmetinformacija, 1971. P. 283-288. (in Russian).

28. Tihomirov, G. I. Tekhnologii obrabotki vody na morskikh sudah. Vladivostok: Morskoj gos. un-t, 2013. (in Russian).

29. Percev V.T., Kozodaev S.P. [Chemization and nanomodifying for the aims of developing cement technologies] Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2020. № 1 (24). P.121-130. (in Russian).

Шабловский Ярослав Олегович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и электротехники Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

УДК: 691

ИННОВАЦИИ В ОТРАСЛИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

ЧАСТЬ 1

О.Л. Фиговский¹, А.З. Штейнбок¹, Д.И. Шуваев², О.Б. Кукина^{2}, Л.А. Кукин²*

¹*Ассоциация изобретателей Израиля, Израиль, 34750, г. Хайфа, ул. Шимкина, 3а*

²*Воронежский государственный технический университет,*

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

**Адрес для переписки: Ольга Борисовна Кукина, E-mail: u00136@vgasu.vrn.ru*

Изучены проблемы, связанные с изготовлением и эксплуатацией стеновых материалов, в том числе – глиняных кирпичей. Производство их, как правило, сопровождается обжигом. Это энергозатратно и наносит вред экологии. В особенности из-за пренебрежительного отношения работников к процессу. Также существует необходимость экономии природных ресурсов и повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик производимых строительных материалов. В связи со всем этим, разрабатываются инновационные технологии производства данных изделий, направленных на решение данных проблем.

Проведён анализ литературных источников, посвященных данной теме. Определено множество инновационных способов переработки отходов различных отраслей промышленности в строительные материалы, приведен пример изготовления строительного кирпича по безобжиговой технологии, рассказано об инновационных кирпичах, имеющих более «глобальное» предназначение.

Ключевые слова: строительные материалы, кирпичи, инновации, технологии, состав

INNOVATIONS IN THE CONSTRUCTION MATERIALS INDUSTRY.

PART 1

O.L. Figovsky¹, A.Z. Steinbock¹, D.I. Shuvaev², O.B. Kukina^{2}, L.A. Kukin²*

¹*Israeli Association of inventors, 3a Shimkin street, Haifa, 34750, Israel*

²*Voronezh state technical university,*

Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letiya oktyabrya str., 84,

**Corresponding author: Olga Borisovna Kukina, E-mail: u00136@vgasu.vrn.ru*

The problems associated with the production and operation of wall materials, including clay bricks, were studied. Their production is usually accompanied by firing. This is energy-consuming and harmful to the environment. Especially because of the neglect of employees to the process. Also, there is a need to save natural resources and improve the physical, mechanical and operational characteristics of manufactured building materials. In connection with all this, innovative technologies for the production of these products are being developed, aimed at solving these problems.

The analysis of literary sources devoted to this topic is carried out. Many innovative ways of processing waste from various industries into building materials are identified, an example of making building bricks using non-burning technology is given, and innovative bricks with a more «global» purpose are described.

Keywords: building materials, bricks, innovations, technologies, composition

Введение. Кирпич является древнейшим строительным материалом. Его научились изготавливать ещё в 3 тысячелетии до н.э. на территории Древнего Египта и Месопотамии. С тех пор, состав этого строительного материала, его габариты, методики изготовления, а так же разновидности постоянно менялись. Но, не смотря на это, он до сих пор остаётся универсальным.

В наше время ни одна отрасль промышленности не обходится без внедрения инноваций. Эта участь коснулась и строительной отрасли, вопреки «строптивости», связанной с многообразием составляющих её субъектов. Составы и способы изготовления стеновых материалов, в т. ч. кирпичей, продолжают совершенствоваться. Отчасти, это связано с попыткой достижения рентабельности и наибольшей экономии при производстве, отчасти – с попыткой частичной или полной нейтрализации связанных с данными процессами трудно-

стей. Или же просто – с потребностью в изготовлении нового, ранее не известного материала, который можно будет эксплуатировать в будущем.

Проблема экономии при производстве строительных материалов не нова: безотходное производство, замена части / всего используемого сырья на переработанные техногенные продукты промышленности, изготовление материалов, соответствующих стандартам, которые могут быть альтернативно используются вместо своих известных стандартных аналогов, всегда были интересны. Сейчас эта проблема стала актуальнее в связи с нарастающим дефицитом природных ресурсов, увеличением площади, занимаемой мусором и общим ухудшением окружающей среды. В связи с этим, применяются инновационные технологии изготовления: в состав вяжущего добавляют переработанные отходы промышленности, кирпичный щебень и/или другие компоненты.

Говоря о нейтрализации – частичной или полной – трудностей, имеются в виду проблемы с обжигом: после формования кирпича, его подвергают естественному высушиванию. Затем, как правило, обжигу. Процесс этот энергоёмкий и состоит из нескольких этапов:

- 1) Выпаривание оставшейся после сушки влаги при температуре 120°C.
- 2) Температуру постепенно поднимают до 600°C. На этом этапе происходит выгорание органических примесей.
- 3) Кирпич подвергают обжигу, придают глине прочность при температуре 1000°C.
- 4) Закалка. Томление в печи при постоянной температуре.
- 5) Естественное остывание.

Суть в том, что на весь процесс требуется колоссальное количество энергии, которое немало стоит. Кроме того, некоторые кирпичные заводы используют для сушки и обжига не газ или жидкое топливо, а уголь. Чтобы сэкономить. В результате, в окружающую среду выделяется масса вредных и опасных веществ. Для решения этих проблем разрабатываются инновационные способы как изготовления вяжущих, так и получения стеновых изделий по безобжиговой технологии.

Гораздо реже встречаются инновационные кирпичи и стеновые материалы, являющиеся не результатом сопряжения переработанных отходов и исходного сырья, а полноценным новым, глобальным, материалом.

Задачи исследования. Изучение способов изготовления и эксплуатации инновационных кирпичей. Для решения цели проведён анализ соответствующих литературных источников. Так же, рассмотрена информация о естественных способах изготовления и эксплуатации как стандартных кирпичей, так и их отходов. Это сделано с целью обоснования возникновения тех или иных инноваций в данной отрасли.

Анализ литературных данных

Кирпичи из переработанных отходов. Как было указано ранее, изготовление строительных материалов из переработанных отходов решает проблемы экономии при производстве, чрезмерного расхода природных ресурсов, загрязнения окружающей среды.

Известен способ изготовления кирпичей с использованием сигаретных окурков и летучей золы. Полученные таким образом материалы отличаются хорошей пластичностью и низкими характеристиками водопоглощения [1].

Также в состав кирпичей включают бумажные отходы. Для большей теплоизоляции [2].

В строительстве используются и осадки сточных вод. Подобно глине и Портландцементу, основными оксидами в этих осадках являются SiO_2 (10-25 %), Al_2O_3 (5-10 %) и CaO (10-30 %), которые увеличиваются в золе осадка после сжигания до 25-50 %, 10-20 % и 15-30 %. Поэтому, эти твердые отходы могут быть использованы не только в качестве сырья для производства экоцемента, кирпича, керамических материалов и легких заполнителей, но и в качестве дополнительных добавок в цементные материалы. Такие, как пуццолановый компонент, мелкий заполнитель или наполнитель [3].

Авторы статьи [4] изготавливали грунтоцементный кирпич с использованием местных отходов глиняного кирпича и мягкого шлама волокнистоцементных производств, сохраняя сырьевые ресурсы путем замены промышленными отходами. Общие пропорции для производства грунтоцементного кирпича составляют 15 % портландцемента, 15 % песка и 70 % латерита. В контрольную формулу добавляли отходы глиняного кирпича со значениями от 10 до 50 % от массы латерита. Для мягкого шлама 5 и 10 % использовали для замены общей массы сухой смеси в контрольной формуле. Образцы были сформированы с помощью ручной кирпичной машины. Результаты показали, что прочность на сжатие всех побочных кирпичей превышает отраслевые стандарты. Максимальная прочность на сжатие была достигнута при 10 % - ной замене латерита на отходы глиняного кирпича. При использовании, как мягкого шлама, так и отходов глиняного кирпича, теплопроводность и вес кирпичей были еще больше снижены. Однако процент водопоглощения, заложенный в кирпичи побочного продукта, был выше, чем в контрольной формуле, но все еще в пределах допустимого промышленного стандарта для применения в несущих конструкциях.

В данной работе [5] авторы исследовали влияние добавок отработанного стекла на физико-механические свойства кирпича. Результаты, полученные в результате этого исследования, показали, что частичная замена натуральной глины в кирпиче отходами натриево-известкового стекла делает полученные кирпичи более устойчивыми и экологически-чистыми. Кирпичи изготавливались с использованием 2 %, 4 %, 10 %, 16 %, 30 %, а 40 % отходов стекла заменяют натуральную глину. Для определения механических характеристик и долговечности подготовленных образцов кирпича проводились испытания на прочность при сжатии, водопоглощение и другие. При добавлении отработанного стекла наблюдалось увеличение прочности на сжатие и снижение водопоглощения образцов.

В архитектуре широко используется «зелёное» строительство. Например, сооружение «зелёных» фасадов. Для таких единиц применяются соответствующие

ющие «зелёные» кирпичи. Они предназначены для обеспечения аспирации, вызванной различными уровнями влажности и температуры. Это способствует росту микро-растительности, и, соответственно, уменьшению загрязнения воздуха – снижению доли углерода и других оксидов [6].

Дроблёную кирпичную крошку так же используют в качестве заполнителя для создания различных строительных материалов. Например, авторы статьи [7] добавляют её в конопляно-известковый композит. Это способствует повышению гигротермических характеристик и теплопроводности. Так же, гипсовые растворы с 75 %-ным содержанием кирпичной крошки – но не более, высокий процент содержания приводит к снижению адгезионной прочности - рекомендуют использовать для восстановления архитектурных украшений [8].

Безобжиговые стеновые материалы. Проблема, связанная с обжигом глиняных кирпичей показана на примере Индии: 250 миллиардов кирпичей производится ежегодно примерно в 100 000 печах, расположенных по всей стране. В основном из-за неэффективных производственных процессов большинство выпускаемых блоков имеют низкое качество, что в конечном итоге становится значительным источником отходов производства [9]. Отсюда, отчасти, и чрезмерное загрязнение воздуха.

В качестве альтернативы обжиговым кирпичам придумали альтернативный, безобжиговый метод их изготовления. В качестве примера можно привести полусухое формование облицовочных кирпичей из фосфогипса – техногенного отхода производства минеральных удобрений, покрывающего огромные участки земли по всему миру. Получаемые таким образом материалы не уступают по характеристикам альтернативно используемым, не нуждаются в обжиге, отличаются дешевизной и решают проблемы экологического уровня [10].

Примером инновационных кирпичей более «глобальной значимости», могут послужить разработки израильской компании Kite Bricks и исследователей из Корнейского университета (Голландия) Sabin Design Lab и Jenny Sabin Studio.

Kite Bricks изобрели строительные блоки Smart Brick из высокопрочного бетона. Их форма – Lego (рис. 1) – позволяет соединять элементы между собой. Воздушные полости служат хорошей тепло- и звукоизоляцией. Соединяются эти блоки через пазы, а затем скрепляются между собой двухсторонней липкой лентой типа 3M VHB [11].



Рис. 1. Один из видов Lego-кирпичей

За Sabin Design Lab и Jenny Sabin Studio – технология изготовления кирпичей Poly Bricks при помощи 3D принтера (рис. 2). Скрепление соседних деталей происходит через пазы конической формы, получившее название «ласточкин хвост». Кирпичи проходят несколько стадий обжига для уменьшения коробления и деформации [12].



Рис. 2. Кирпичи Poly Bricks

Заключение. Инновационные технологии производства стеновых строительных материалов по большей части не являются «революционными» и направлены на решение экономических и экологических проблем в той или иной отрасли промышленности. Наиболее интересные инновации активно рассматриваются и регулярно дополняются – как, например, изготовление строительного кирпича с использованием пластмассовых отходов или полусухое формование стеновых материалов из фосфогипса. Те же материалы, что являются «революционными», отличаются высокой рыночной стоимостью и не могут быть введены в общее пользование.

Список литературы

1. Mishra C., Verma A., Ratra A., Jain A., Agrawal A., Dodeja, A., Dubey, A. Effects of cigarette butts in fly ash cement bricks // Lecture Notes in Civil Engineering, 2021, vol 77. P. 637-648.

2. Mandili B., Taqi M., Chakir H., Douzane O., Errouaiti M. Development of new construction material for thermal insulation of building based on aggregate of waste paper and cement // Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung, 2020, Volume 56, Issue 6. P. 1753-1765.

3. Chang Z., Long G., Zhou J.L., Ma C. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review // Resources, Conservation and Recycling, 2020, Volume 154. (номер статьи 104606).

4. Kongkajun N., Laitila E.A., Ineure P., Prakaypan W., Cherdhirunkorn B., Chakartnarodom P. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production// Case Studies in Construction Materials, 2020, Volume 13. (номер статьи e00448).

5. Hasan M.R., Siddika A., Akanda M.P., Islam M.R. Effects of waste glass addition on the physical and mechanical properties of brick // Innovative Infrastructure Solutions, 2021, Volume 6, Issue 1. (номер статьи 36).

6. Aldeek Z.A.O. Towards efficient green architecture and sustainable facades using novel brick design // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics, Volume 15, Issue 2, April 2020. P. 205-210.

7. Abdellatef Y., Khan, M.A., Khan, A., Alam, M.I., Kavagic, M. Mechanical, thermal, and moisture buffering properties of novel insulating hemp-lime composite building materials // Materials, 2020, Volume 13, Issue 21. P. 1-18. (номер статьи 5000).

8. Beldjilali S., Bougara A., Aguiar J., Bouhamou N., Dabbebi R. Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick // Construction and Building Materials, 2020, Volume 259. (номер статьи 120416).

9. Mohan M., Apurva A., Kumar N., Ojha A.A. Review on Use of Crushed Brick Powder as a Supplementary Cementitious Material // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Volume 936, Issue 1. (номер статьи 012001).

10. Золотухин С.Н. Безотходная технология переработки фосфогипса при добыче редкоземельных металлов: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий / С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, М.Л. Золотухин, Д.И. Шуваев. Воронеж, 2019. С. 50-51.

11. Фиговский О.Л., Штейнбок А.З., Инновации в строительстве. Строительство: новые технологии - новое оборудование №11, 2020.

12. Сергиенко Ольга. 3D-печатные керамические блоки Poly Bricks заменят привычные кирпичи / 3Dwiki, 2014.

References

1. Mishra C., Verma A., Ratra A., Jain A., Agrawal A., Dodeja, A., Dubey, A. Effects of cigarette butts in fly ash cement bricks // Lecture Notes in Civil Engineering, 2021, vol 77. P. 637-648.

2. Mandili B., Taqi M., Chakir H., Douzane O., Errouaiti M. Development of new construction material for thermal insulation of building based on aggregate of waste paper and cement // *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 2020, Volume 56, Issue 6. P. 1753-1765.
3. Chang Z., Long G., Zhou J.L., Ma C. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review // *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, Volume 154, No 104606.
4. Kongkajun N., Laitila E.A., Ineure P., Prakaypan W., Cherdhirunkorn B., Chakartnarodom P. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production// *Case Studies in Construction Materials*, 2020, Volume 13, No e00448.
5. Hasan M.R., Siddika A., Akanda M.P., Islam M.R. Effects of waste glass addition on the physical and mechanical properties of brick // *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, Volume 6, Issue 1, No 36.
6. Aldeek Z.A.O., Towards efficient green architecture and sustainable facades using novel brick design // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, Volume 15, Issue 2, April 2020. P. 205-210.
7. Abdellatef Y., Khan, M.A., Khan, A., Alam, M.I., Kavgić, M. Mechanical, thermal, and moisture buffering properties of novel insulating hemp-lime composite building materials // *Materials*, 2020, Volume 13, Issue 21. Pages 1-18. No 5000
8. Beldjilali S., Bougara A., Aguiar J., Bouhamou N., Dabbebi R. Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick // *Construction and Building Materials*, 2020, Volume 259. No 120416.
9. Mohan M., Apurva A., Kumar N., Ojha A. A Review on Use of Crushed Brick Powder as a Supplementary Cementitious Material // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Volume 936, Issue 1. No 012001.
10. Zolotukhin S.N. Waste-free technology of processing phosphogypsum in the extraction of rare earth metals: collection of tr. winners of the competition of research works of students and postgraduates of VSTU in priority areas of development

of science and technology / S.N. Zolotukhin, O.B. Kukina, M.L. Zolotukhin, D.I. Shuvaev. Voronezh, 2019. P. 50-51.

11. Figovsky O.L., Steinbock A.Z., Innovations in construction. Construction: new technologies - new equipment of. No. 11, 2020.

12. Sergienko Olga. 3D-printed ceramic blocks polybricks will replace the usual bricks / 3dwiki, 2014.

Фиговский Олег Львович – президент Ассоциации изобретателей Израиля, иностранный член РААСН

Штейнбок Аркадий Залманович – член Ассоциации изобретателей Израиля, лектор в колледже Шенкарь

Шуваев Дмитрий Игоревич – студент группы МИОФ-201 строительного факультета Воронежского государственного технического университета

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

Кукин Леонид Александрович – аспирант кафедры цифровой и отраслевой экономики Воронежского государственного технического университета

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

А.А. Леденев^{1}, В.Т. Перцев², Д.Е. Барабаш¹,
А.Н. Внуков¹, Н.С. Перова¹, О.М. Иванова¹*

¹*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*

²*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^{1}, V.T. Pertsev², D.E. Barabash¹,
A.N. Vnukov¹, N.S. Perova¹, O.M. Ivanova¹*

*¹«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*

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

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

Scientific-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 cement concretes 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].

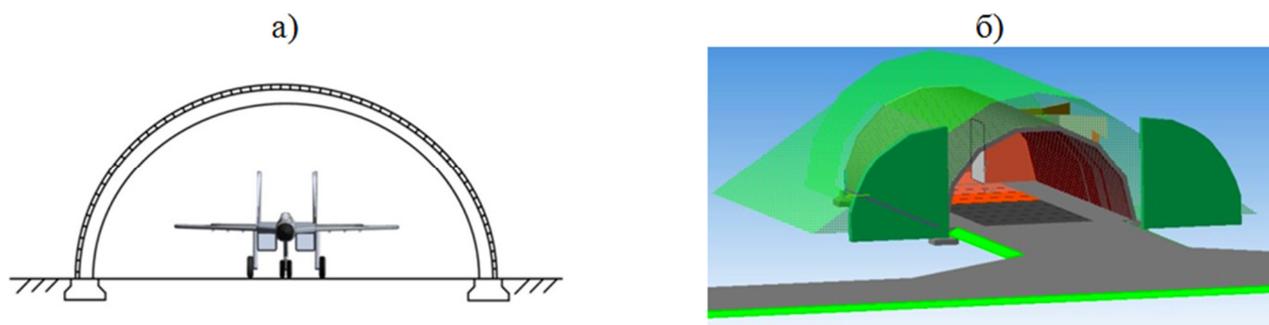


Рис. 1. Схема (а) и модель (б) арочного защитного укрытия для самолетов с применением железобетонных конструкций

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 суще-

ствует необходимость скоростного восстановления аэродромных покрытий, разрушенных обычными средствами поражения.

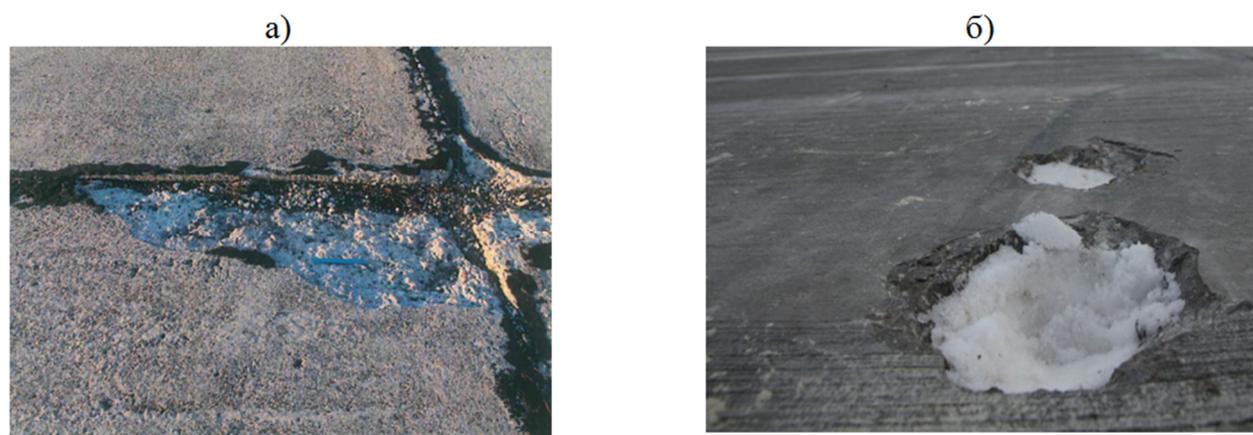


Рис. 2. Поврежденные участки аэродромных покрытий

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 модифицировать 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).

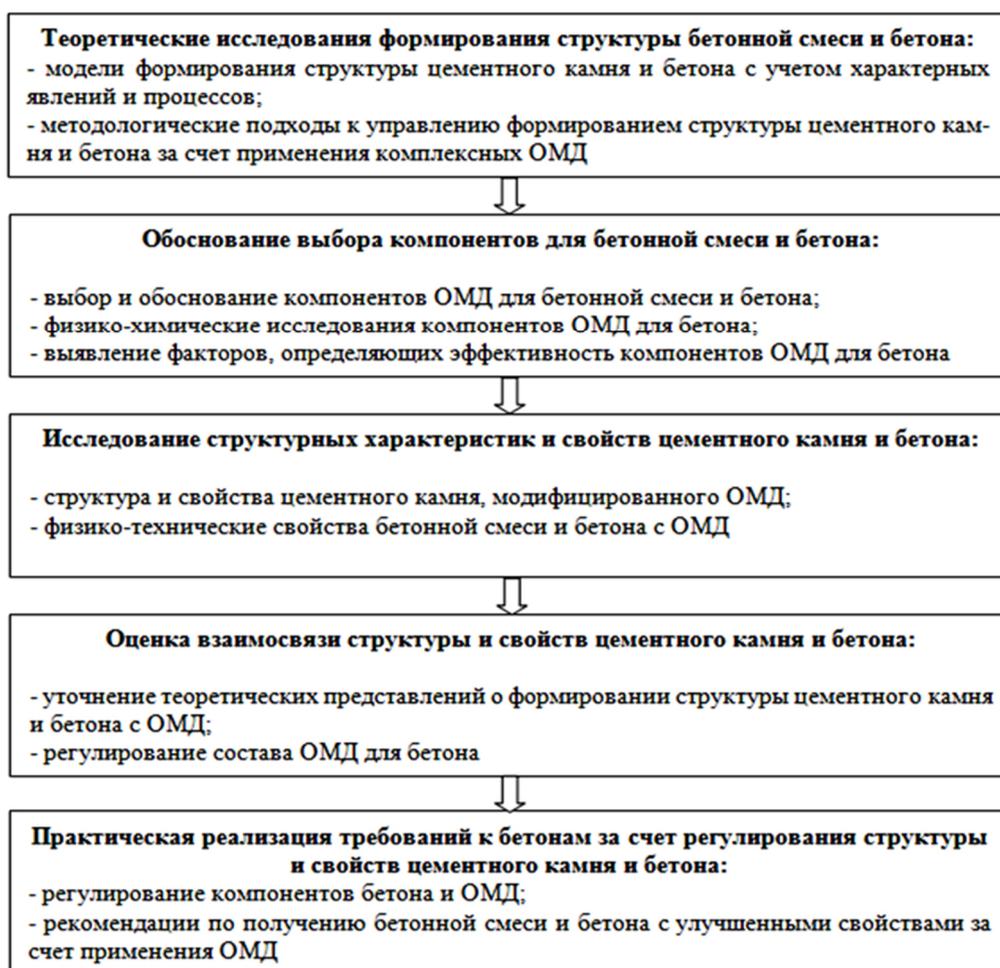


Рис. 3. Схема реализации методологического подхода, направленного на получение бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами, за счет применения комплексных ОМД

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 В80, морозостойкостью F400, 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].

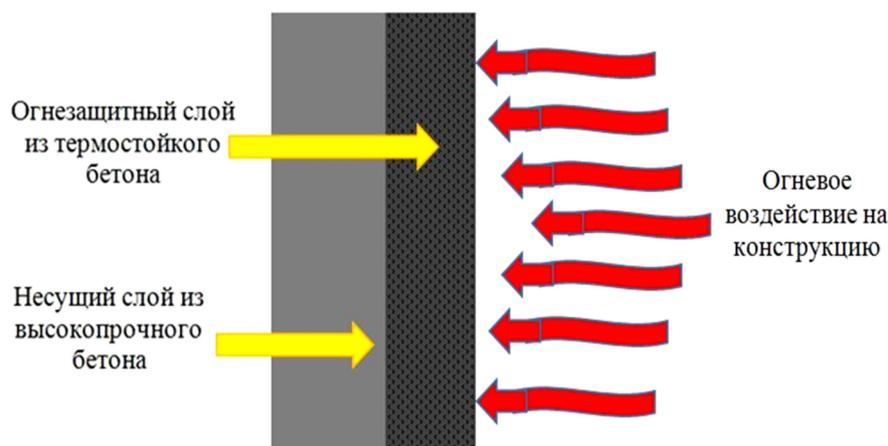


Рис. 4. Схема двухслойной огнестойкой железобетонной конструкции с применением высокопрочного бетона, модифицированного комплексной ОМД [7, 19]

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., Гуторов 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. Приступюк 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. Aerodromnyepokrytiia. Sovremennyivzgliad [Airfield of a covering. A modern sight]. M.: Fiziko-matematicheskaiia literatura, 2002. 528 p.

4. Vinogradov A.P. Nadezhnost' i sertifikatsiia tsementobetonnykh 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 konstruksii 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». Seriiia «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, старший научный сотрудник 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)

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ВЛАЖНОСТНОЙ УСАДКИ

*Ю.В. Макушина, Е.И. Шмитько, Н.А. Белькова**

*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

В работе рассмотрены основные факторы, определяющие величину влажностной усадки цементных бетонов. Выявлены возможности повышения качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки через фактор вещественного (химического) состава добавок-модификаторов пластифицирующего и водоредуцирующего действия. Установлено, что в зависимости от вещественного (химического) состава можно выделить два блока добавок-пластификаторов либо понижающих, либо повышающих величину влажностной усадки цементного камня.

Ключевые слова: деформации усадки, добавки-пластификаторы, поверхностное натяжение, капиллярное давление, вещественный состав

WAYS TO OPTIMIZE CEMENT QUALITY OF CONCRETE BY HUMIDITY SHRINKAGE INDEX

*Yu.V. Makushina, E.I. Shmit'ko, N.A. Bel'kova**

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

**Corresponding author: Belkova Natalya Anatolyevna, E-mail: verlnata@mail.ru*

The main factors determining the value of moisture shrinkage of cement concrete are considered in the work. The possibility of improving the quality of cement concretes by the moisture shrinkage medium through the factor of the material (chemical) composition of additives-modifiers of plasticizing and water reducing effect was revealed. It has been found that depending on the material (chemical) composition, it is possible to distinguish two blocks of additives-plasticizers that either reduce or increase the moisture shrinkage of cement stone.

Keywords: shrinkage deformations, plasticizer additives, surface tension, capillary pressure, material composition

Введение. Вопросы повышения качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки остаются актуальными и в настоящее время, прежде всего, применительно к модифицированным бетонам – бетонам с добавками различного действия, без которых современная технология уже не представляется возможной. Второй причиной актуальности подобных исследований является изменение климата, которое проявляется в повышении температуры и снижении влажности окружающей среды в летний период, что существенно влияет на качество бетонных конструкций. Например, для Воронежской области, в условиях аномально жаркого и сухого лета как 2010, так и 2020 года при возведении монолитных сооружений были обнаружены трещины усадочного характера. Подобное явление наблюдалось и для конструкций заводского изготовления после их хранения на складе готовой продукции.

Изучением закономерностей проявления цементными бетонами деформаций усадки на различных этапах изготовления и эксплуатации занимались многие как отечественные, так и зарубежные ученые [1-11]. В зависимости от времени проявления усадочных деформаций, по данным ряда авторов [5-8], выделяют следующие типы усадки: контракция (усадка в процессе схватывания и твердения цемента за счет разницы в объемах исходного клинкера и продуктов гидратации); влажностная (гидравлическая) усадка за счет испарения влаги из

конструкции при ее высушивании; и усадка ползучести (проявляется на этапе эксплуатации в виде постепенного увеличения со временем деформаций конструкции при постоянно действующей нагрузке) [8].

Все эти типы усадки взаимосвязаны и вытекают одна из другой. Так, сформировавшаяся на этапе твердения структура цементного камня с системой пор и дефектов будет проявлять себя на этапе эксплуатации либо в виде влажностной усадки при высушивании конструкции, либо в виде ползучести (в условиях действия постоянных нагрузок).

Предметом исследований, результаты которых приводятся в данной статье, является влажностная усадка.

В основе механизма влажностной усадки, по представлениям, изложенным в работах А.Е. Шейкина, А.Е. Десова, Е.И. Чернышова, Г.С. Славчевой и других [1, 2, 4, 6], лежат представления о процессах изменения напряженного состояния материала в ходе его увлажнения и высушивания за счет работы внутренних сил. На начальном этапе высушивания происходит изменение баланса капиллярных сил и сил поверхностного натяжения в процессе испарения свободной, капиллярной и адсорбционной воды из пор соответствующего радиуса. При дальнейшем обезвоживании (когда происходит испарение межслоевой и межкристаллической воды) в работу включаются силы когезионного и адгезионного взаимодействия и силы внутренних связей в кристаллах. И на последнем этапе высушивания, при влажности материала, стремящейся к нулю, вступают в действие силы упругого противодействия деформированию твердой фазы.

Таким образом, величина влажностных деформаций оказывается функцией равнодействующей этих сил. Баланс внутренних сил в каждый момент обезвоживания материала будет зависеть, прежде всего, от его состава и структуры. Изменяя структуру материала и, как следствие, характер и силу связи его твердой фазы и порового пространства с водой, мы можем управлять величиной влажностных деформаций.

С точки зрения структуры материала снижение величины влажностной усадки может быть достигнуто путем: снижением объема цементирующих веществ и пор; увеличением степени закристаллизованности новообразований цементного камня; изменением характера пористости в сторону увеличения их среднего эффективного радиуса и уменьшения содержания пор наноразмеров (межкристаллических пор).

С технологической точки зрения это возможно за счет изменения характеристик сырьевых материалов и параметров технологии получения бетонов.

Целью наших исследований было выявление основных (критических) параметров и факторов, влияющих на величину влажностной усадки и разработка предложений по ее оптимизации за счет одного из выделенных факторов.

Экспериментальная часть

Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе осуществлялось выявление критических параметров, влияющих на величину влажностной усадки. Для этого применялся один из «семи инструментов качества» - «Диаграмма Исикавы» [12], которая позволяет выделить основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на рассматриваемую проблему.

На втором этапе детально рассматриваются особенности влияния одного из факторов (добавок-пластификаторов) на показатели усадки цементных систем.

На третьем этапе проводились исследования влияния добавок-пластификаторов различного типа на величину усадки.

Результаты и их обсуждение

Согласно диаграмме Исикавы (рис. 1) основными критическими параметрами, оказывающими наибольшее влияние на величину влажностной усадки, являются:

1. Тонкость помола и нормальная густота цемента.
2. Фракционный состав заполнителей.

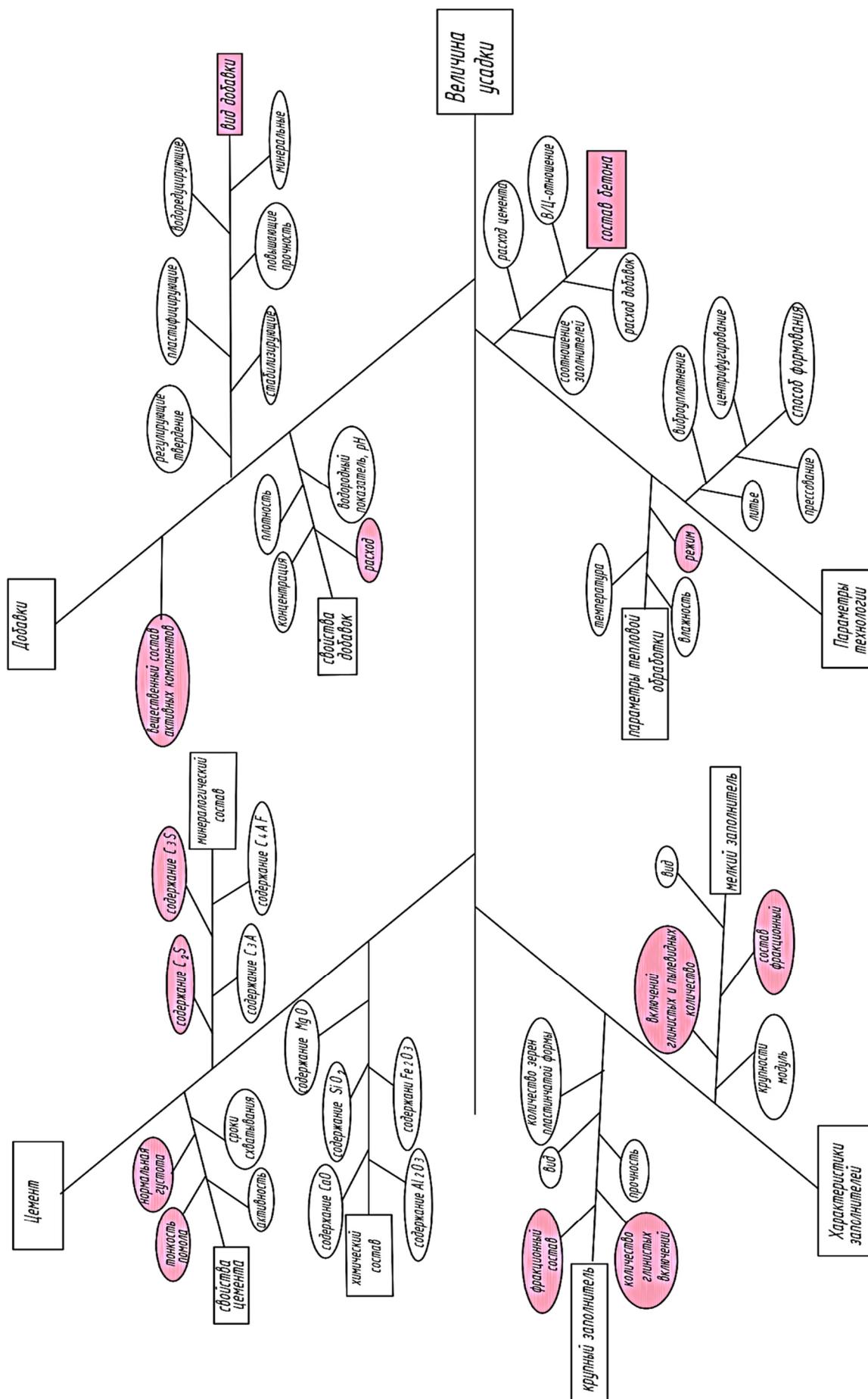


Рис. 1. Диаграмма Исикавы для выявления определяющих факторов, влияющих на величину усадки цементных бетонов

3. Количество примесей в заполнителях.
4. Вид и вещественный состав добавок.
5. Способ формования изделий.
6. Режим тепло-влажностной обработки.

Каждый из выделенных факторов оказывает существенное влияние на структуру цементного бетона, прежде всего на характер его пористости, а также на плотность упаковки и способность сопротивляться нагрузкам и деформациям, как внешним, так и внутренним.

Так как современные бетоны немислимы без модифицирующих добавок, то такой параметр, как вид используемой добавки, а также ее вещественный состав, на первый план и становятся определяющими. Что касается вида используемых добавок, то их спектр очень велик. Существует целый класс добавок, снижающих усадку бетонов. Однако они относятся к добавкам для бетонов специального назначения и не нашли широкого применения. Наибольшее распространение получили добавки пластифицирующего и водоредуцирующего действия [13]. Нами уже были проведены исследования влияния вида добавок на показатели влажностной усадки [14, 15], в результате которых было установлено, что вещественный состав добавок существенно влияет на параметры структуры бетона и величину влажностной усадки.

Согласно [15] все используемые в настоящее время суперпластификаторы можно разделить на 4 группы, для которых характерен свой химический состав и структурная формула (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики добавок пластифицирующего действия

Тип добавки	Марка	Структурная формула	Преимущества	Недостатки
Лигно-сульфонат (LS)	Полипласт П-1 Реопласт NSL 10 Зика Пластимент Лигаопан Б-3 ЛСТМ-2 Бетокем ЛП ВРДА Пластимент БВ40 Полипласт П-1		-увеличение прочностных характеристик; -увеличение подвижности бетонной смеси; -нормированное воздуховоление.	-увеличение расслаиваемости бетонной смеси; - увеличение сроков схватывания

Продолжение табл. 1

тип добавки	марка	структурная формула	преимущества	недостатки
Нафталинсульфонат (NS)	С-3 СМФ Дофен ДФ СП НКНС 40-03 ПФМ-НЛК Полипласт СП-1 Агипласт Кормикс Кризо Флюид Ломар Д		-снижение расхода цемента в равноподвижных смесях на 15-20 %; -увеличение прочностных характеристик на 15 %; -повышение бетонов с повышенной водонепроницаемостью.	-увеличение расслаиваемости смеси; - увеличение сроков схватывания.
меламинсульфонат (ms)	зикамент фф химком ф-1 сп 10-03 перамин ф изола фм-86 конпласт м1 мелмент		-снижение расхода цемента; -повышение моростойкости; -снижение расхода воды затворения.	-повышение деформаций усадки и ползучести бетонов и растворов; -увеличение сроков схватывания.
поликарбоксилатный эфир (рсе)	криопласт п гпм «ультра» вискокрит-20ше зика вискокрит-3 зика вискокрит-5 аддимент фм 32 аддимент фм 40 аддимент фм 62		-увеличение прочностных характеристик; -увеличение плотности и однородности бетона, увеличение подвижности;	-замедление схватывания смесей и твердение бетонов и растворов в ранние сроки; -уменьшение водонепроницаемости.

Таким образом, суперпластификаторы на основе лигносульфонатов, нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов можно отнести к группе ПАВ с линейно-циклическим углеводородам с разными активными группами, а на основе поликарбоксилатных эфиров – к группе линейно-цепных углеводородов. Все это не может не отразиться на структуре и, как следствие, на показателях усадки цементного камня.

Для дальнейших исследований были выбраны по две добавки из каждой выделенной группы (табл. 2).

Характеристики добавок

Тип	Товарная марка	Внешний вид	Дозировка, %	Плотность, г/см ³
Лигносульфوناتы	Реопласт NSL 10	Жидкость коричневого цвета	0,5-1,5	1,142
	Зика Пластимент		0,2-1,0	1,083
Нафталинсульфонаты	ПФМ-НЛК	Жидкость темно-коричневого цвета	0,6-0,8	1,184
	Полипласт СП-1		0,4-0,8	1,221
Меламинсульфонаты	Зикамент ФФ	Раствор красно-коричневого цвета	0,8-1,2	1,163
	Химком Ф-1		0,3-0,5	1,180
Поликарбоксилатный эфир	Криопласт П	Раствор желтовато-коричневого цвета	0,5-1,5	1,180
	ГПМ «Ультра»		0,6-1,2	1,080

На начальной стадии исследований для каждого вида добавки изучали влияние вида и расхода добавки на величину поверхностного натяжения методом отрыва капель. Расход добавок варьировался от 0,3 до 1,5 % от массы цемента не зависимо от рекомендаций производителей. По полученным результатам величины поверхностного натяжения были проведены расчеты величины капиллярного давления по формуле, представленной в [15].

Далее проводились исследования влияния вещественного состава добавки и В/Ц-отношения на величину влажностной усадки. Расходы добавок составили: Реопласт NSL 10 – 1,5 % от массы цемента; Зика Пластимент – 0,6 %; ПФМ-НЛК – 0,6 %; Полипласт СП-1 – 0,8 %; Зикамент ФФ – 0,8 %; Химком Ф-1 – 0,3 %; Криопласт П – 0,6 %; ГПМ «Ультра» – 1,2 %.

Величина деформаций усадки определялась на образцах размером 4×1×16 см. Обезвоживание осуществлялось в закрытых сосудах при парциальном давлении пара около нуля. Линейные деформации определялись с помощью устройства с тензодатчиком часового типа. Исследования были проведены с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова ВГТУ.

Результаты определения величин поверхностного натяжения и капиллярного давления представлены на рис. 2 и 3.

По полученным данным видно, что добавки можно разделить на два больших блока. Для первого блока добавок характерен классический вид изо-

терм адсорбции: при повышении расхода добавки величина поверхностного натяжения снижается. К этому блоку относятся добавки на основе лигносульфонатов (Реопласт NSL 10 и Зика Пластимент) и поликарбоксилатных эфиров (Криопласт П и ГПМ «Ультра»). При этом добавки на основе поликарбоксилатов снижают величину поверхностного натяжения в меньшей степени (до $54-60 \cdot 10^{-3}$ Н/м по сравнению с $46 \cdot 10^{-3}$ Н/м для лигносульфонатов), что можно объяснить особенностью механизма действия этих добавок, в котором помимо эффекта от адсорбции на поверхности и снижения трения между частицами, проявляется и стерический эффект за счет боковых цепей в структуре добавок.

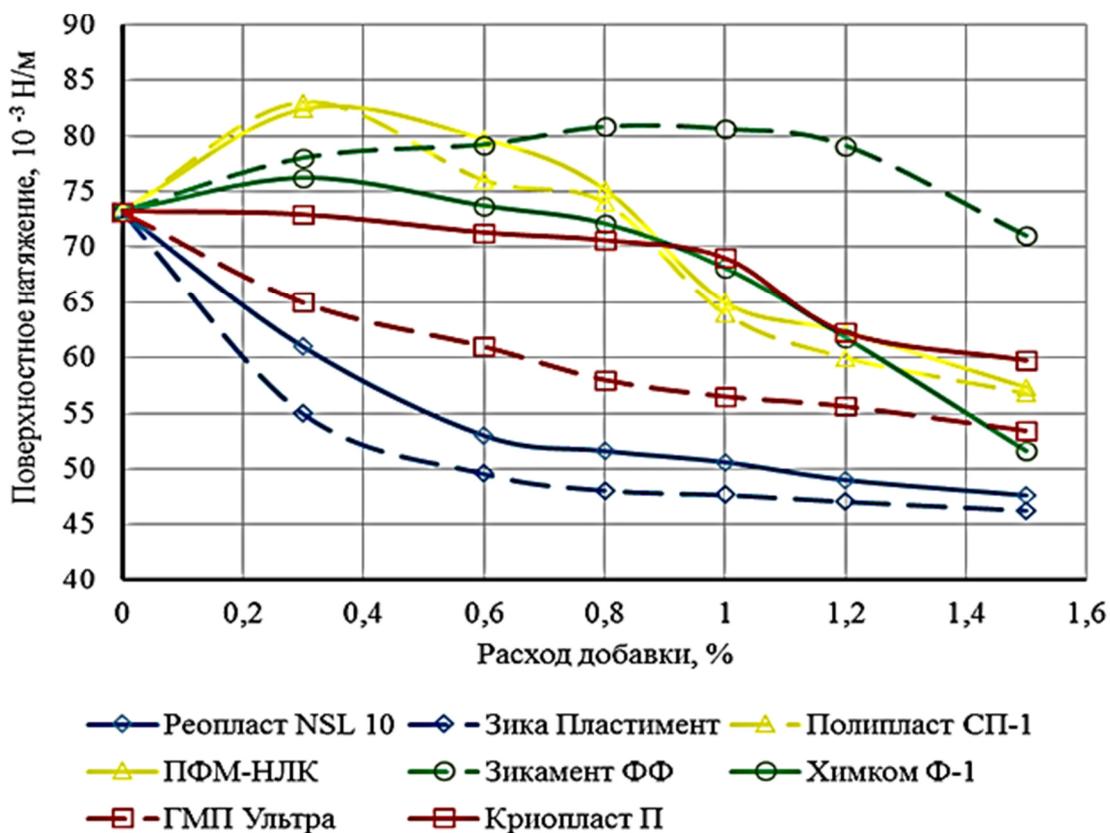


Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения растворов добавок

Так же подобный эффект объясняется и наличием в некоторых из добавок дополнительных компонентов (например, добавка Криопласт П является еще и противоморозной). Также примечательным является тот факт, что практически для всех добавок этого блока по изотермам поверхностного натяжения можно

определить точку ККМ (определяющую эффективность действия добавок), которая находится в пределах концентраций, рекомендованных производителями добавок.

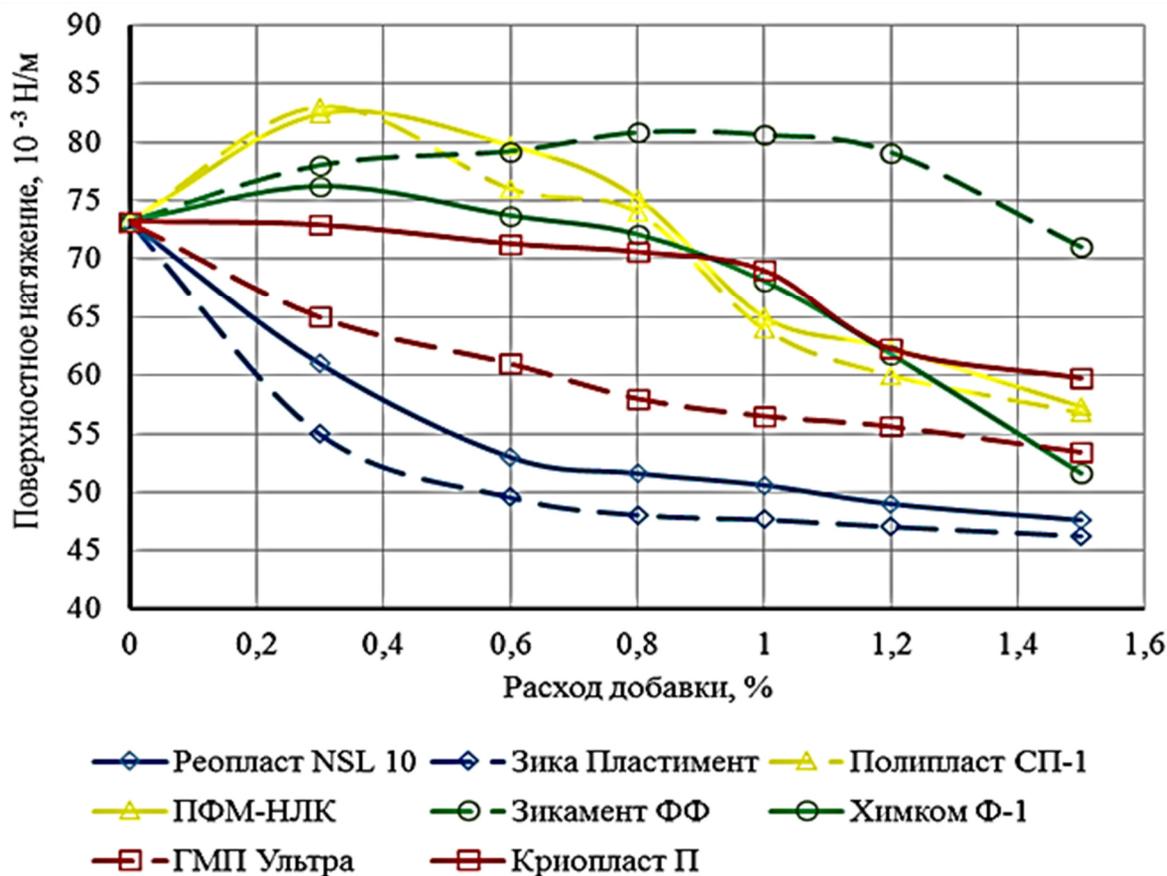


Рис. 3. Зависимости величины капиллярного давления от вида и расхода добавок

Для второго блока добавок, при низких значениях расхода, характерно повышение величины поверхностного натяжения до $83 \cdot 10^{-3}$ Н/м. При дальнейшем увеличении расхода добавок она снижается до $52 \dots 71 \cdot 10^{-3}$ Н/м. К этому блоку относятся добавки на основе нафталинсульфонатов (ПФМ-НЛК и Полипласт СП-1) и меламинасульфонатов (Зикамент ФФ и Химком Ф-1). При этом величина поверхностного натяжения растворов добавок достигает значений, соответствующих поверхностному натяжению чистой воды, при расходах либо близких, либо значительно превышающих рекомендованные производителями (табл. 2). Так же для добавок этого блока не представляется возможным опре-

делить точку ККМ в выбранном диапазоне расходов добавок. Таким образом, расходы, рекомендованные производителями добавок, ориентированы только на экономические критерии, а не на технологические и в предложенном диапазоне расходов добавок их действие не эффективно.

Кривые зависимости величины капиллярного давления коррелируются с изотермами поверхностного натяжения (рис. 3). Для первого блока добавок величины капиллярного давления ниже, чем для чистой бездобавочной системы и уменьшаются по мере увеличения расхода добавок до $4,7 \dots 3,7 \cdot 10^3$ кПа. Для второго блока эти значения при малых расходах добавок гораздо выше (в пределах от $5,7 \cdot 10^3$ до $6,7 \cdot 10^3$ кПа), чем у чистой воды ($5,8 \cdot 10^3$ кПа) и постепенно снижаются по мере увеличения их расхода (до $4,1 \dots 5,7 \cdot 10^3$ кПа).

Как было сказано выше, на начальном этапе обезвоживания главными в балансе сил, влияющих на величину усадки, являются капиллярные и поверхностные силы. Исходя из этого, можно сделать предварительный прогноз о величинах деформаций усадки цементного камня с исследованными добавками. Так для первого блока добавок можно предположить, что значения усадочных деформаций будут небольшими относительно бездобавочной системы. Для второго блока – наоборот величины усадки должны быть выше, как по сравнению с эталонной системой, так и с системами с добавками первого блока.

Это подтверждается результатами определения величины полных усадочных деформаций, представленных на рис. 4. По полученным данным видно, для добавок первого блока значения усадочных деформаций примерно равны или несколько ниже чем у эталона (2,55 мм/м) и составляют от 2,0 (для добавки ГПМ Ультра) до 2,6 мм/м (для добавки Зика Пластимент) при В/Ц=0,25. При повышении водо-цементного отношения до 0,4 это соотношение сохраняется: величина усадки чистой бездобавочной системы составляет 4,9 мм/м, а систем с добавками – 4,3...4,6 мм/м).

Для добавок, относящихся ко второму блоку при В/Ц=0,25 значения усадочных деформаций систем с добавками довольно значительно превышают величину усадки эталонной системы (например, до 60 % с добавкой ПФМ-НЛК).

Для систем с В/Ц=0,4 этот разрыв становится менее значительным (до 15 %), однако в целом опять наблюдается тенденция к увеличению значений усадочных деформаций. Это подтверждает как наши прогнозы, так и выделенные производителями добавок недостатки (табл. 1).

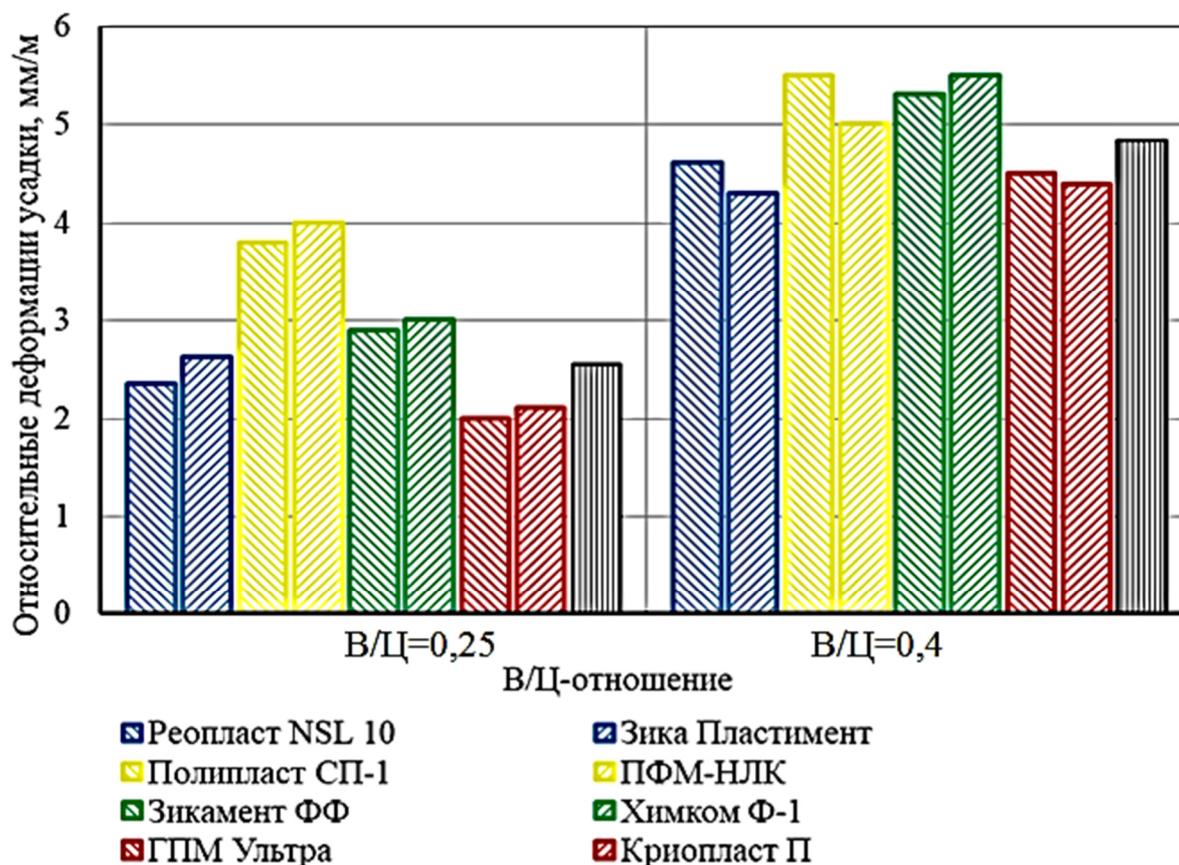


Рис. 4. Зависимости величины усадочных деформаций от вида добавок и В/Ц-отношения

Заключение. Проведенные исследования позволили выделить основные факторы, влияющие на величину усадки цементных систем. Одним из основных факторов является вид и вещественный состав применяемых модифицирующих добавок.

Относительно добавок пластифицирующего и водоредуцирующего действия можно выделить два блока по показателю вещественного (химического) состава: первый блок – лигносульфонаты и поликарбоксилаты; второй блок – меламинсульфонаты и нафталинсульфонаты. Установлено, что добавки первого

блока обеспечивают некоторое снижение величины усадки цементных систем, а второго – повышение. Для уточнения механизма этого явления необходимо провести дополнительные исследования порового пространства и структуры новообразований затвердевшей цементной системы.

Список литературы

1. Шейкин А.Е., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 343 с.

2. Десов А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона.// Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. Состояние проблемы и перспективы развития. / Под ред. С.В. Александровского. М., Стройиздат, 1978. С. 211-255.

3. Slowik V., Schmidt M., Kässler D., Eiserbeck M. Capillary Pressure Monitoring in Plastic Concrete for Controlling Early-Age Shrinkage Cracking. Journal of the Transportation Research Board. 2014. No. 2441. P. 1-5.

4. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Ч. 1. Контекст проблемы и вопросы теории //Строительные материмы. 2014. № 1-2. С. 105-112.

5. Вальц К. Усадочные деформации и напряжения бетона: пер. с нем. // II Международный конгресс по бетону в Висбадене. М.: Госстройиздат, 1960. С. 55-60.

6. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Физико-химическая природа взаимосвязи свойств строительных материалов с их влажностным состоянием // Academia. 2008. № 1. С. 87-92.

7. Калиновская Н.Н., Котов Д.С., Щербицкая Е.В. Усадочные деформации модифицированного бетона. Причины и способы устранения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. 2018. С. 82-87.

8. Леонович С.Н. Капиллярная усадка и трещинообразование бетона в раннем возрасте // Вестник ПГТУ. 2017. №3. С. 22-33.
9. Slowik V., Schmidt M., Fritzsich R. Capillary pressure in fresh cement based materials and identification of the air entry value // Cement & Concrete Composites. 2008. № 30(7). P. 557-565.
10. Flatt R.J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology // Materials and Structures. 2004. 37. P. 289-300.
11. Flatt R.J. Dispersion forces in cement suspensions // Cement and Concrete Research. 2004. 34. P. 399-408
12. Исикава К. Японские методы управления качеством / Сокр. пер. с англ. / Науч. ред. и авт. предисл. А.В. Гличев. М.: Экономика, 1988. 215 с.
13. Добавки в бетоны и строительные растворы. Учебно-справочное пособие / Л.И. Касторных. Ростов н / Д.: Феникс, 2005. 221 с.
14. Шमितько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 48-51.
15. Шमितько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1 (42). С. 128-135.

References

1. Sheikin A.E., Brousser M.I. Structure and properties of cement concretes. М.: Stroyizdat, 1979. 343 p.
2. Desov A.E. Some questions of the theory of concrete shrinkage // Creep and shrinkage of concrete and reinforced concrete structures. State of the problem and prospects for development. / Ed. S.V. Alexandrovsky. М.: Stroyizdat, 1978. P. 211-255.

3. Slowik V., Schmidt M., Kässler D., Eiserbeck M. Capillary Pressure Monitoring in Plastic Concrete for Controlling Early-Age Shrinkage Cracking. Journal of the Transportation Research Board. 2014. No. 2441. P. 1-5.
4. Chernyshov E.M., Slavchsva G.S. Management of operational deformation-capacity and crack resistance of macroporous (cellular) concrete. PART 1. The context of the problem and questions of theory//Building matter. 2014. № 1-2. P. 105-112.
5. Waltz K. Shrinkage strains and stresses of concrete: pen with it //II International Congress on Concrete in Wiesbaden. M.: Gosstroyizdat, 1960. P. 55-60.
6. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. The physical and chemical nature of the relationship between the properties of building materials and their humidity state//Academia. 2008. № 1. P. 87-92.
7. Kalinovskaya N.N., Kotov D.S., Shcherbitskaya E.V. Shrinkage deformations of modified concrete. Reasons and ways to eliminate//Bulletin of Polotsk State University. Series F. 2018. P. 82-87.
8. Leonovich S.N. Capillary shrinkage and cracking of concrete at an early age//Bulletin of PSTU. 2017. №3. P. 22-33.
9. Slowik V., Schmidt M., Fritsch R. Capillary pressure in fresh cement based materials and identification of the air entry value // Cement & Concrete Composites. 2008. № 30(7). P. 557-565.
10. Flatt R.J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology // Materials and Structures. 2004. 37. P. 289-300.
11. Flatt R.J. Dispersion forces in cement suspensions // Cement and Concrete Research. 2004. 34. P. 399-408.
12. Ishikawa K. Japanese Quality Management Methods / Sokr. Pen from English / Scientific. Ed. And aut. preface. A.V. Glichev. M.: Economics, 1988. 215 p.
13. Additives to concrete and mortars. Educational and reference manual / L.I. Kastorny. Rostov n/D.: Phoenix, 2005. 221 p.
14. Shmitko E.I., Belkova N.A., Makushina Yu.V. Influence of surfactants on moisture shrinkage of concrete//Construction materials. 2018. № 4. P. 48-51.

15. Shmitko E.I., Makushina Yu.V., Belkova N.A., Milokhin I.V. Wet shrinkage of concrete: the influence of the composition and structure of the plasticizing additives used//Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2020. № 1 (42). P. 128-135.

Макушина Юлия Валерьевна – аспирант кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Шмитько Евгений Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

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

**ФОРМОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА УВЛАЖНЕННЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕСС-ПОРОШКОВ**

В.В. Белов

*Тверской государственный технический университет,
Российская Федерация, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22*

Адрес для переписки: Белов Владимир Владимирович,

E-mail: vladim-bel@yandex.ru

В работе представлены предпосылки оптимального проектирования составов сырьевых смесей для производства формованных керамических изделий, основанных на закономерностях формирования полидисперсных структур. Предложен выбор методов расчета оптимальной влажности сырых смесей, обеспечивающих оптимальные параметры их уплотнения. Влияние влажности сырьевой смеси на упаковку ее частиц, а также плотность и формовочные свойства прессовки объясняется действием капиллярной аутогезии.

Ключевые слова: аутогезия, капиллярные силы, влияние влажности, реологические свойства, керамический пресс-порошок

MOLDING PROPERTIES OF WETTED CERAMIC PRESS POWDERS

V.V. Belov

*Tver State Technical University,
Russian Federation, 170026, Tver, Af. Nikitin Quay, 22*

Corresponding author: Belov Vladimir Vladimirovich,

E-mail: vladim-bel@yandex.ru

The paper presents the prerequisites of optimal design of crude mixtures compositions for the production of molded ceramic products based on the law of formation of polydisperse structures. The choice of methods for calculation of optimum moisture content of raw mixtures providing optimal parameters of their damping is suggested. The effect of moisture of the raw mixture on the packaging of its particles, as well as the density and molding properties of the compaction, is explained by the action of capillary autohesion.

Keywords: autohesion, capillary forces, moisture effects, rheological properties, ceramic press powder

Введение. Традиционная технология полусухого прессования, применяемая для производства стеновых материалов, таких как керамический кирпич и плитки, силикатный кирпич и др. отличается достаточно высоким расходом энергоносителей. Для технологии прессования принципиальное значение имеет подбор оптимальной влажности смеси для получения наибольшей плотности прессовки после прекращения нагрузки [1].

На формирование структуры дисперсной сырьевой смеси, в значительной степени наследуемой в структуре и свойствах конечных изделий, оказывает влияние аутогезия частиц смеси. В общем случае составляющие силы аутогезии подразделяются на три группы [2]:

первая группа – Ван-дер-Ваальсовы и электрические силы проявляются самопроизвольно при взаимодействии как отдельных частиц, так и их множества;

вторая группа – когезионные и капиллярные силы, для их проявления необходимы соответствующие условия: внешнее механическое усилие (для прижатия частиц друг к другу) или наличие влаги в сыпучем порошковом материале;

третья группа – силы механического зацепления, которые проявляются только при аутогезионном взаимодействии множества частиц.

Анализ исследований взаимосвязи размеров частиц различных типов порошковых материалов с порядком величины силы аутогезии показал, что имеющиеся экспериментальные данные носят противоречивый характер. Авторами

разных работ приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию средних размеров порошковых частиц на насыпную плотность [3]. В результатах этих исследований прослеживается общая тенденция: насыпная плотность уменьшается вместе с уменьшением среднего размера частиц.

Столь существенная разница в оценке влияния сил аутогезии на поведение сыпучих порошковых материалов, которая встречается в публикациях, может быть следствием сложного механизма действия сил разной природы. Кроме того, сложность исследуемой системы повышается вследствие того факта, что силы взаимодействия частиц зависят от свойств материала частиц, их морфологии, количества и фракционного состава [4, 5].

В работе [6] было исследовано влияние фракционного состава сферических стеклянных частиц размерами от 5 до 42 мкм на насыпную плотность. Исследования проводились как экспериментально, так и с помощью компьютерного моделирования методом дискретных элементов [7]. Был сделан вывод, что для повышения точности прогнозирования насыпной плотности порошков необходимо учитывать силы Ван-дер-Вальса, а также было указано, что в дальнейших исследованиях требуется проанализировать влияние влажности и метода уплотнения на достигаемую плотность упаковок сферических частиц. Влияние характеристик поверхности и свойств материала частиц в данной работе не учитывались.

Авторы работ [8-12] выполнили ряд экспериментальных исследований сил молекулярного взаимодействия сферических частиц металлических и керамических порошков посредством атомно-силовой микроскопии. Основной вывод данной работы в том, что расчетные и экспериментальные данные могут различаться на десятичный порядок. Силы молекулярного взаимодействия между частицами определяются не только химическим составом этих частиц, но и составом абсорбционного слоя на их поверхности и её шероховатостью. Поэтому, расчетные значения сил молекулярного взаимодействия носят оценочный характер.

В работе [13] подробно исследован эффект появления электростатического заряда на поверхности частиц порошков в процессе их смешивания и измельчения, проведен обзор методов определения наличия, знака и величины электростатического заряда. Сделаны выводы о том, что электростатическое взаимодействие частиц может играть определяющую роль в структурообразовании сыпучего порошкового материала и приводить к образованиям агрегатов из порошковых частиц. Важность учета электрических сил подчеркивают и авторы работы [14], которые моделировали процесс нанесения слоя порошка на рабочую поверхность машины для селективного лазерного сплавления.

Анализ публикаций по теме сил аутогезии в сыпучих порошковых материалах показал, с одной стороны, важность и актуальность данного вопроса, а с другой стороны, отсутствие систематизированных и статистически достоверных данных о закономерностях влияния сил аутогезии на структуру и реологию сыпучих материалов. Особенно это касается случаев конкретных типов материалов – керамических, металлических, полимерных, сухих строительных смесях, композиционных, а также в отношении зависимости сил аутогезии от морфологии частиц порошков и характеристик их поверхности.

Экспериментальная часть

В работе изучались формовочные свойства керамического пресс-порошка, применяемого в производстве облицовочных плиток.

На рис. 1 изображены зависимости насыпной плотности пресс-порошка в пересчете на сухое вещество от влажности. На данном рисунке помимо зависимости насыпной плотности порошка (кривая 1), определенной по стандартной методике (воронка), показана зависимость насыпной плотности (кривая 2) по результатам измерений при свободном истечении материала (желоб). Вторым способом позволил выявить зависимость насыпной плотности порошка при влажности пресс-порошка более 16 %, в отличие от первого способа, при котором

измерить эту характеристику в указанном диапазоне влажности оказалось невозможным из-за комкования гранул.

В целом насыпная плотность пресс-порошка при возрастании влажности снижается вследствие капиллярной аутогезии, причем минимум достигается при влажности около 17 %, т. е. при влажности, достаточно далеко отстоящей от реальной формовочной влажности пресс-порошка в производстве плиток (обычно 6-8 %).

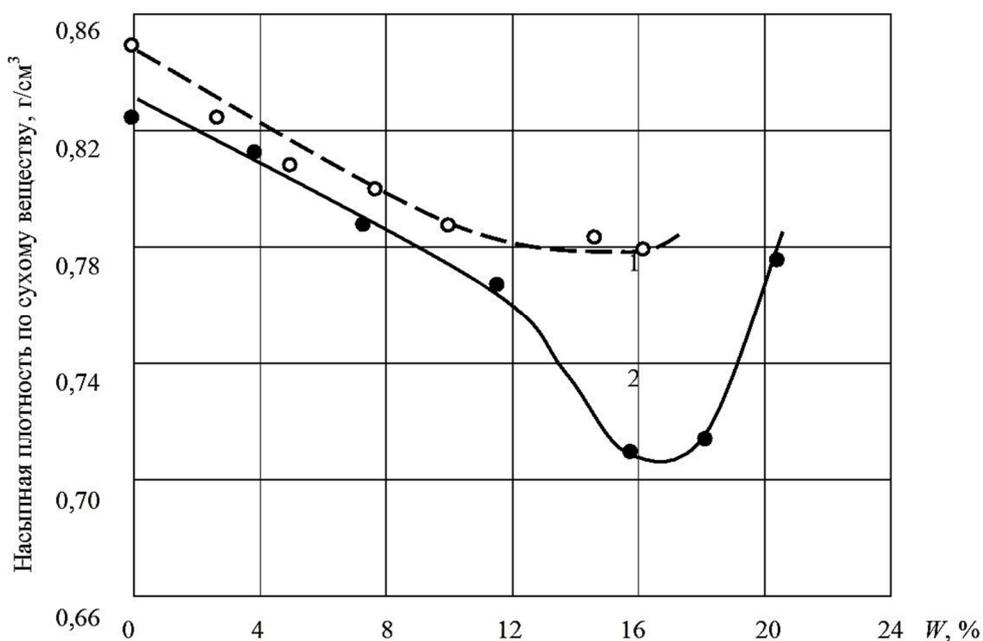


Рис. 1. Насыпная плотность пресс-порошка по сухому веществу в зависимости от влажности при измерениях стандартным методом (1) и наклонным желобом (2)

Влияние влажности на структуру пресс-порошка в уплотненном состоянии и связанные с ней формовочные свойства в зависимости от влажности изучали с помощью прибора ПОФС-1 (ДК) [15].

Формовочные свойства согласно разработанной методике [16] определяются как коэффициенты уравнения (1) – коэффициент уплотнения $C_{уп}$ и обратная величина средней плотности под единичным давлением $1/\rho_{он}'$, – названные деформативными характеристиками материала.

$$\ln p = \frac{1}{C_{\text{уп}}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{он}}'} + E_p - \frac{1}{\rho_o} \right), \quad (1)$$

где p – давление прессования, МПа; ρ_o – средняя плотность материала после снятия давления, г/см³; $C_{\text{уп}}$ – постоянная, названная коэффициентом уплотнения, см³/г; $1/\rho_{\text{он}}'$ – постоянная, равная обратной величине средней плотности материала при сжатии под единичным давлением, см³/г; E_p – упругое расширение материала, см³/г, равное:

$$E_p = \frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_{\text{он}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{он}}$ – средняя плотность материала при сжатии под давлением p , г/см³.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены графики сжатия и уплотнения пресс-порошка при различной влажности пресс-порошка, построенные по уравнению (1).

Рис. 2 показывает, что прямолинейность графиков сжатия и уплотнения при влажности 9,1 % и 10,8 %, свидетельствующая о соответствии условий уплотнения порошка уравнениям (1) и (2) нарушается. Очевидно, это связано с переходом системы в двухфазное состояние, при котором дальнейшее уплотнение становится невозможным.

Влажность оказывает большое влияние на уплотнение порошка. Зависимости плотности системы после уплотнения от влажности при фиксированных значениях давления прессования (рис. 3) показывают, что при повышении влажности пресс-порошка до определенного предела плотность полуфабриката значительно увеличивается при одном и том же давлении прессования. Максимум и точка перегиба кривых на рис. 3 соответствуют прекращению уплотнения системы в результате достижения ею двухфазного состояния в мо-

мент сжатия, пунктирной линией на рисунке показано геометрическое место точек, отвечающих критическим значениям влажности и плотности системы в момента достижения ею двухфазного состояния при сжатии. Максимумы на экспериментальных кривых смещены вправо от пунктирной линии вследствие того, что при медленном уплотнении порошка в форме дефометра происходит частичное отжатие влаги из пор системы. При быстром прессовании полуфабриката на заводских прессах следует ожидать прекращения уплотнения системы при меньшей влажности. Поэтому в качестве критической влажности целесообразно принимать расчетную влажность, при которой система переходит в двухфазное состояние, т. е. когда объем воды становится равным объему пор.

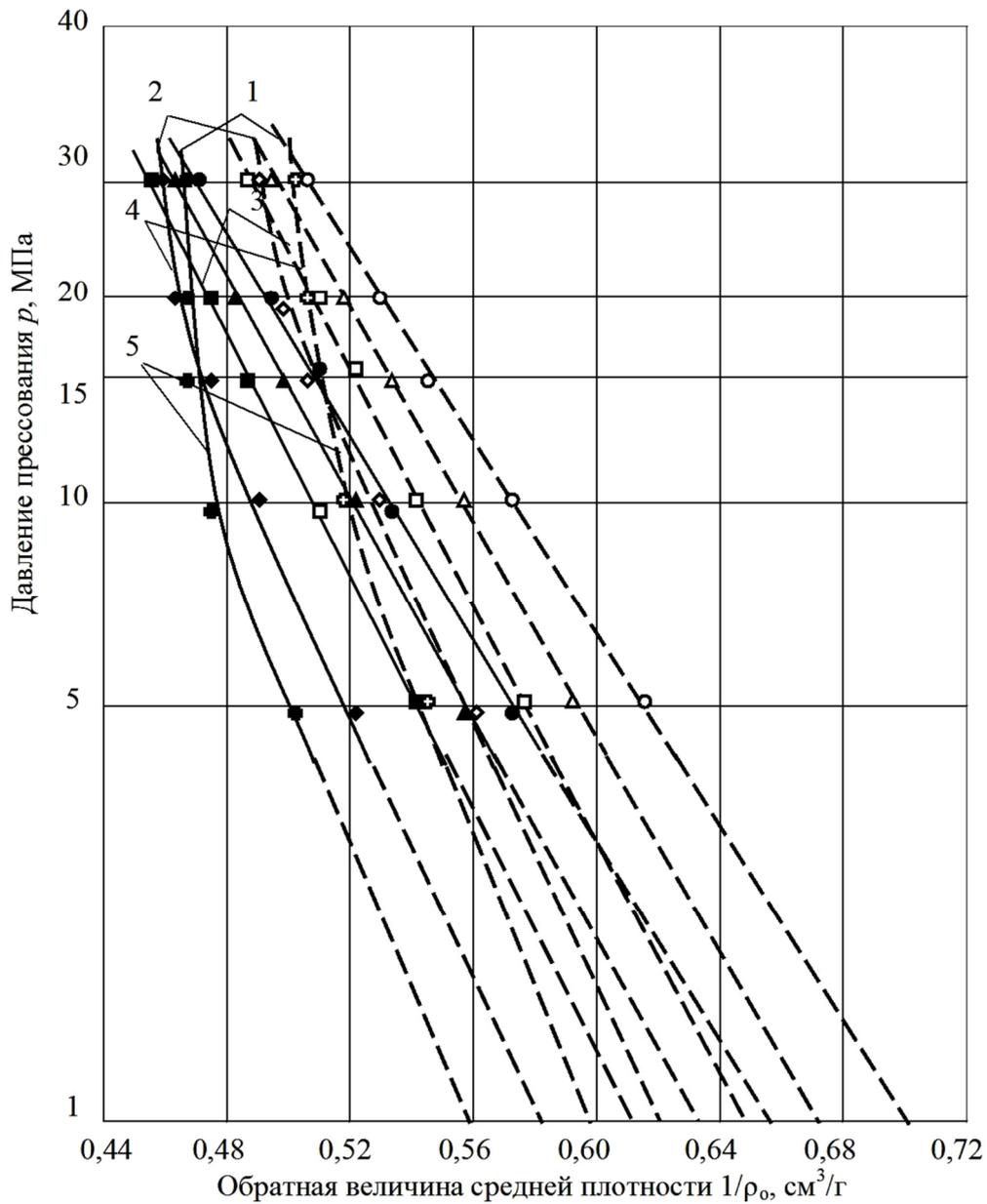


Рис. 2. Графики сжатия и уплотнения пресс-порошка при разной влажности
 1 – влажность 4,2 %; 2 – 6,0 %; 3 – 7,6 %; 4 – 9,1 %; 5 – 10,8 %

Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности (рис. 3) существенно отличаются от зависимостей насыпной плотности пресс-порошка (см. рис. 1), характеризующихся минимумом насыпной плотности при влажности, соответствующей максимуму капиллярной аутогезии.

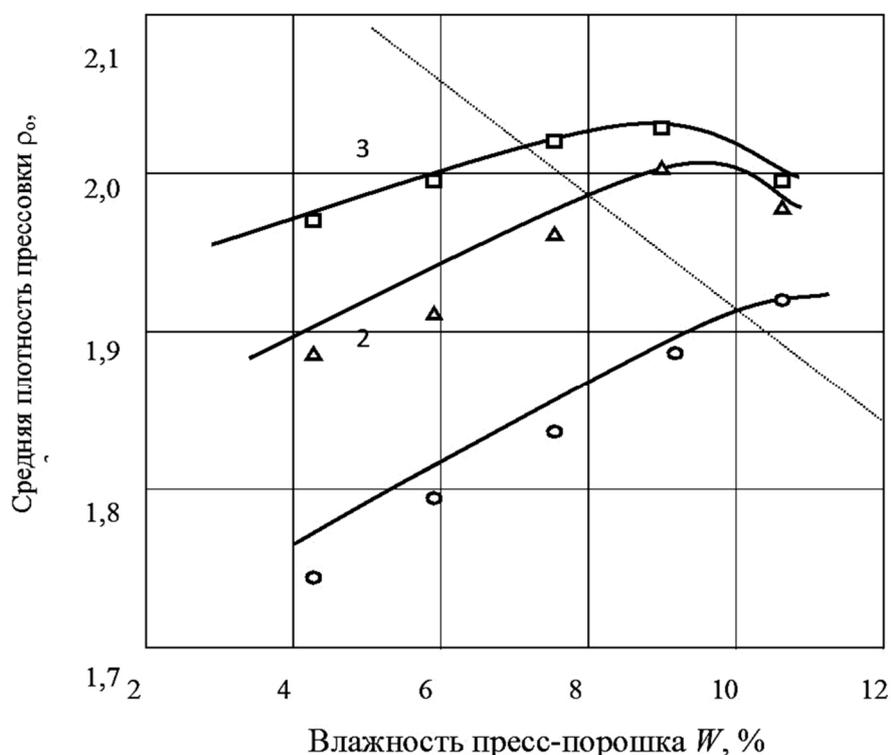


Рис. 3. Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности при давлении прессования: 1 – 10 МПа; 2 – 20 МПа; 3 – 30 МПа

При прессовании керамических пресс-порошков при давлениях, принятых в производстве керамических изделий, критические значения влажности в 1,5-2 раза меньше влажности, соответствующей максимуму капиллярной аутогезии. Эти различия объясняются тем, что при уплотнении пресс-порошка из пластичного глиняного сырья определяющее значение имеет уменьшение сил внутреннего трения между частицами с сохранением аутогезионных связей.

Следовательно, при реальных условиях прессования керамических пресс-порошков необходимо определять критические значения влажности, которые соответствуют не только максимально возможному уплотнению прессовки, но и максимально возможному значению в данных условиях капиллярному сцеплению. Эти значения влажности являются наилучшими также для увеличения прочности готовых изделий [17].

Заключение. Таким образом, исследования аутогезии сырьевых порошковых материалов является актуальной задачей для современной прикладной

науки, техники и технологии. Основными целями исследования явления аутогезии могут стать прогнозирование свойств порошковых материалов при различной влажности и рациональное построение технологических процессов их переработки, хранения и транспортировки. Оптимальное значение формовочной влажности пресс-порошка в производстве керамических изделий должно определяться с учетом баланса сил аутогезии, непосредственно влияющих на структуру и свойства как полуфабриката, так и готовых изделий.

Список литературы

1. Миронов В.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей: Научное издание / В.А. Миронов, В.В. Белов, А.И. Голубев, М.А. Смирнов. СПб: РИА «Квинтет», 2008. 416 с.
2. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. Металлургия, 1978.
3. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б., Кутейникова А.Л. Влияние габитуса кристаллов заполнителя и размера частиц нанодисперсного технологического связующего на свойства пористого проницаемого керамического материала // Новые огнеупоры. 2007. № 9. С. 45-48.
4. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б., Усс А.М. Влияние размера и формы кристаллов электроплавленного корунда на микроструктуру и проницаемость пористой керамики // Новые огнеупоры. 2009. № 12. С. 20-25.
5. Тарасовский В.П., Шляпин А.Д., Омаров А.Ю., Васин А.А., Кормилицин М.Н. Сравнительный анализ показателей подвижности и уплотняемости штифпорошков F240 разных производителей // Новые огнеупоры. 2018. № 9. С. 35-39.
6. Parteli E. J. R. et al. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders //Scientific reports. 2014. Т. 4. P. 6227.
7. Pöschel, T. & Schwager, T. Computational Granular Dynamics (Springer, Heidelberg, 2005).
8. Pöschel, T. & Schwager, T. Computational Granular Dynamics (Springer,

Heidelberg, 2005).

9. Götzinger, M. & Peukert, W. Dispersive forces of particle-surface interactions: direct AFM measurements and modelling. *Powder Technol.* 130. (2003). P. 102-109.

10. Götzinger, M. & Peukert, W. Particle Adhesion Force Distributions on Rough Surfaces. *Langmuir* 20, (2004). P. 5298-5303.

11. Li, Q., Rudolph, V. & Peukert, W. London-van der Waals adhesiveness of roughsurfaced particles. *Powder Technol.* 161, (2006). P. 248-255.

12. Ackler H.D., French R.H., Chiang Y.M. Comparisons of Hamaker constants for ceramic systems with intervening vacuum or water: From force laws and physical properties // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1996. Т. 179. №. 2. P. 460-469.

13. S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, M. Ghadiri, Triboelectric charging of powders: a review, *Chem. Eng. Sci.* 22 (2010). P. 5781-5807.

14. Parteli E. J. R., Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing // *Powder Technology.* 2016. Т. 288. P. 96-102.

15. А.с. СССР № 1430834. Устройство для определения формовочных свойств керамических порошков / И.И. Берней, В.В. Белов. Приор. от 25.07.86 г. Оpubл. в Б.И. № 38. 1988.

16. А.с. СССР № 1627891. Способ определения формовочных свойств керамических порошков / И.И. Берней, В.В. Белов. Приор. от 10.10.88 г. Оpubл. Б.И. № 6. 1991.

17. Суслов А.А., Шмитько Е.И., Важинский А.Т. Роль внутренних сил в процессах раннего структурообразования керамических формовочных масс // *Известия вузов. Строительство.* 1998. № 11-12. С. 63-68.

References

1. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I., Smirnov M.A. Optimization of compositions for the manufacture of building mixtures: Scientific publication (St. Petersburg: RIA «Quintet»). 2008

2. Zimon A.D. and Andrianov E.I. Autogenesis of bulk materials (Metallurgy). 1978
3. Krasny B.L., Tarasovsky V.P., Krasny A.B., Kuteinikova A.L. Influence of aggregate crystal habitus and particle size of nanodispersed process binder on properties of porous permeable ceramic material // *New refractories*. 2007. № 9. P. 45-48.
4. Krasny B.L., Tarasovsky V.P., Krasny A.B., Uss A.M. Influence of time-measure and form of electrofused corundum crystals on microstructure and permeability of porous ceramics // *New refractories*. 2009. № 12. P. 20-25.
5. Tarasovsky V.P., Shlyapin A.D., Omarov A.Yu., Vasin A.A., Kormilitsin M.N. Comparative analysis of indicators of mobility and compactability of grinders F240 different manufacturers // *New refractories*. 2018. № 9. P. 35-39.
6. Parteli E. J. R. et al. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders // *Scientific reports*. 2014. T. 4. P. 6227.
7. Pöschel, T. & Schwager, T. *Computational Granular Dynamics* (Springer, Heidelberg, 2005).
8. Pöschel, T. & Schwager, T. *Computational Granular Dynamics* (Springer, Heidelberg, 2005).
9. Götzinger, M. & Peukert, W. Dispersive forces of particle-surface interactions: direct AFM measurements and modelling. *Powder Technol.* 130, (2003). P. 102-109.
10. Götzinger, M. & Peukert, W. Particle Adhesion Force Distributions on Rough Surfaces. *Langmuir* 20, (2004). P. 5298-5303.
11. Li, Q., Rudolph, V. & Peukert, W. London-van der Waals adhesiveness of roughsurfaced particles. *Powder Technol.* 161, (2006). P. 248-255.
12. Ackler H.D., French R.H., Chiang Y.M. Comparisons of Hamaker constants for ceramic systems with intervening vacuum or water: From force laws and physical properties // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1996. T. 179. №. 2. P. 460-469.
13. Matsusaka S., Maruyama H., Matsuyama T., Ghadiri M., Triboelectric charging of powders: a review, *Chem. Eng. Sci.* 22 (2010). P. 5781-5807.

14. Parteli E. J.R., Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing //Powder Technology. 2016. Т. 288. P. 96-102.

15. A.S. USSR No. 1430834. Device for determination of molding properties of ceramic powders/I.I. Berney, V.V. Belov. Prior. from 25.07.86, Published in B.I. No. 38. 1988.

16. A.S. USSR No. 1627891. Method for determination of molding properties of ke-frame powders/I.I. Berney, V.V. Belov. Prior. from 10.10.88, Published B.I. NO. 6. 1991.

17. Suslov A.A., Shmitko E.I., Vazhinsky A.T. Izvestiya vuzov. Construction vol. 11–12, 1998. P. 63-68.

Белов Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций Тверского государственного технического университета

УДК 539.3:620.193:669

**ВОЗДЕЙСТВИЕ КОРРОЗИОННОЙ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ
И АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГОВОЙ ОБОЛОЧКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

*А.А. Трещев, В.О. Кузнецова**

*Тульский государственный университет,
Российская Федерация, 300012, Тульская обл., г. Тула, пр. Ленина, 92*

**Адрес для переписки: Кузнецова Виолетта Олеговна,*

E-mail: kuznecova violetta@mail.ru

В данной работе выстроена математическая модель напряжённого состояния оболочки цилиндрической формы из сплава титана ВТ1-0, нагруженной внутренним равномерно распределённым давлением. Для расчёта использована модель, обладающая тройной нелинейностью, выраженная с помощью нормированных пространств напряжений. В результате выведены нелинейные разрешающие уравнения для расчёта оболочки, построена математическая модель решаемой задачи изгиба тонкостенной цилиндрической оболочки в процессе влияния агрессивной водородной среды на её напряжённое состояние. Выстроен алгоритм решения проблемы влияния агрессивных водородных сред на оболочки из титанового сплава. На практике решение производилось с помощью двухшагового способа хронологических возмущений параметров и применения расчетных комплексов MatLab и Maple. Для получения решения системы дифференциальных разрешающих уравнений, использован метод конечных разностей. Представлено сравнение полученного решения с учетом тройной нелинейности задачи с результатами классической теории без учета воздействия водородной среды. В результате сравнения количественных и качественных различий выявлен более точный учет воздействия типа напряжённого состояния. Модель воздействия газонасыщения, выстроенная в работе, базировалась на учете воздействия кинетики агрессивного водородного

окружения на механические качества сплавов титана и распространения в них процесса охрупчивания. Выбранный подход решения задачи имеет удобный механизм контроля разносопротивляемости и показывает хорошую точность согласования получаемых теоретических результатов с эмпирическими параметрами деформирования большого круга материалов при различных типах напряженного состояния.

Ключевые слова: наводороживание, изотропный материал, охрупчивание, концентрация, коррозионная среда, титановый сплав

CORROSIVE HYDROGEN-CONTAINING MEDIA AND ANALYSIS OF STRESS STATE CIRCULAR CYLINDER SHELL MADE OF TITANIUM ALLOYS

*A.A. Treschov, V.O. Kuznetsova**

Tula State University,

Russian Federation, 300012, Tula region, Tula, Lenin Ave., 92

**Corresponding author: Violetta O. Kuznetsova, E-mail: kuznecova violetta@mail.ru*

In this paper, a mathematical model of the stress-strain state of a cylindrical shell made of titanium alloy VT1-0, loaded with an internal uniformly distributed pressure, is constructed. For the calculation, a model with triple nonlinearity was used, expressed with the help of normalized stress spaces. As a result, nonlinear resolving equations for calculating the shell are derived, and the construction of a mathematical model of the problem of bending a cylindrical shell during the action of an aggressive hydrogen medium on its stress state is described. An algorithm for solving the problem of the influence of aggressive hydrogen media on titanium alloy shells is constructed. In practice, the solution was made using a two-step method of sequential perturbations of parameters and the use of Mat Lab and Maple application packages. To solve a system of differential equations, we used a finite difference method. A comparison of the obtained solution, pay attention to the triple nonlinearity of the problem, with the results of the classical theory, without pay attention to the result of a hydrogen medium, is presented. As a result of comparison of quantitative and qualitative differences, a more accurate account of the influence of the type of stress state is revealed. The

model of the effect of gas saturation built up in the work was based on pay attention to the result of the kinetics of an aggressive hydrogen medium on the mechanical characteristics of titanium alloys and the propagation of the embrittlement process in them. The chosen approach to solving the problem has a convenient mechanism for monitoring the resistance to different types of stress and shows good accuracy of matching the obtained theoretical results with experimental data on the deformation of a large range of materials under various complex types of stress.

Keywords: hydrogenation, isotropic material, embrittlement, concentration, corrosive environment, titanium alloy

Введение. Впервые модель расчёта элементов сооружений, работающих в агрессивных водородосодержащих средах, принимающая во внимание изменения механических характеристик материала во времени, была модель, описанная в работах В.В. Петрова, И.Г. Овчинникова, А.Б. Рассады [1-3]. Чтобы построить математические модели поведения материалов в водородной среде, было предложено применять теорию структурных параметров Ю.Н. Работнова, учитывая физико-химические эффекты на поверхности и в объёме деформируемого тела. В систему основных параметров помимо напряжения и деформации включаются добавочные параметры q_i , которые учитывают влияние среды на материал. Так $q_1 = \lambda$ – параметр, описывающий распределение водородной среды по всему объёму элемента; $q_2 = \xi$ – характеристика типа напряжённого состояния.

Объект исследования – круговая цилиндрическая оболочка, выполненная из сплава титана ВТ1-0, работающая под внутренним давлением до 5 МПа, жёстко заземленная по контуру. Длина оболочки 3 м, радиус – 0,5 м. Положение случайной точки средней поверхности цилиндрической оболочки определено гауссовыми координатами α_1 и α_2 , при учете: u – осевых, v – касательных, w – радиальных перемещений под воздействием поперечной нагрузки q , в соответствии с рис. 1. В данной задаче параметры Ляме и главные кривизны имеют вид:

$$\tilde{A} = 1; \tilde{B} = R; k_1 = 0; k_2 = R^{-1}, \quad (1)$$

где R – радиус оболочки.

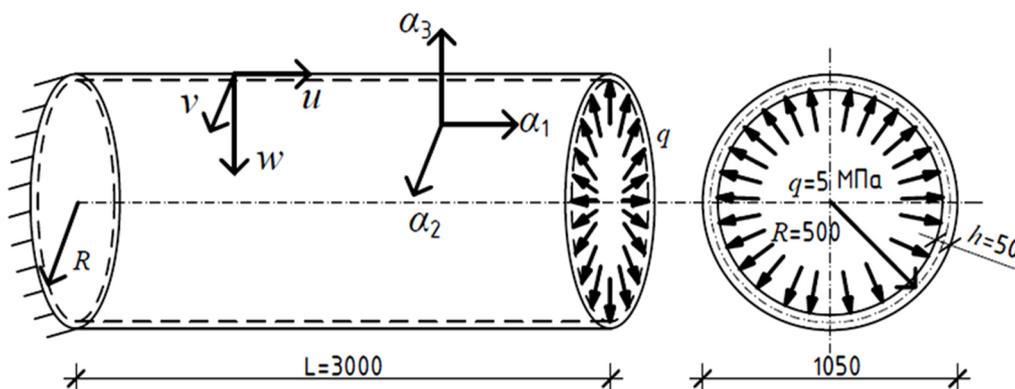


Рис. 1. Расчётная схема оболочки

Рассматривается равновесное состояние оболочки в форме цилиндра с толщиной h , находящейся под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водородосодержащей среды с концентрацией λ . Запишем кинетический потенциал деформаций в виде [11]:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2 + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2]^n, \quad (2)$$

где, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – физические функции потенциала квазилинейной и нелинейной частей, зависящие от степени водородонасыщения. Связи механических характеристик заданного материала вычислены в результате полиномиальной интерполяции значений коэффициентов при заданном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05 %) и для сплава титана ВТ1-0 принимают вид:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^\lambda; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda); E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda); \\ A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda); D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda), \end{aligned} \quad (4)$$

где e_{ik}, p_{ik} – коэффициенты многочленов $i=0...3; k=1...3$.

Взаимосвязь тензоров деформаций и напряжений можно определить из потенциала деформаций (2) по формулам Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \gamma_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \tau_{ij}}; \quad (i, j, k = 1, 2, 3). \quad (5)$$

В теории цилиндрических оболочек [10, 11] применимы следующие соотношения:

а) составляющие деформации в средней поверхности:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = v_{,2} + k_2 w + 0,5(-w_{,2} + k_2 v)^2; \quad \gamma = v_{,1} + u_{,2} - w_{,1}(w_{,2} + k_2 v). \quad (6)$$

б) компонент изгибной деформации средней поверхности связан с перемещениями соотношениями:

$$\chi_1 = -w_{,11},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – удлинения; γ – сдвиговые деформации; u – осевые перемещения; v – касательные перемещения; w – радиальные перемещения при действии нагрузки q .

Компоненты деформации в точках, отстоящих на расстоянии α_3 от средней поверхности, выражаются через составляющие касательных и изгибных деформаций:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3 \chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2 + \alpha_3 \chi_2; \quad \gamma_{12} = \gamma + 2\alpha_3 \chi_{12}. \quad (7)$$

Принимая во внимание осесимметричность данной задачи и то, что оболочка находится под внутренним равномерно распределенным давлением q , кинематические зависимости принимают вид:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = k_2 w; \quad \chi_1 = -w_{,11}; \quad e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3 \chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2. \quad (8)$$

Деформации и напряжения связаны следующими соотношениями:

$$\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Обращая соотношения (9), получаем корреляцию напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $[B]=[A]^{-1}$. Здесь A_{11}, A_{12}, \dots – составляющие симметричной матрицы податливостей $[A]$ – т. е. функции, содержащие функции потенциала $W_1(2)$.

Усилия, моменты и поперечную силу найдём при помощи напряжений:

$$N_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 d\alpha_3; \quad N_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 d\alpha_3; \quad M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 \alpha_3 d\alpha_3; \\ M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 \alpha_3 d\alpha_3; \quad Q_1 = M_{1,1}.$$

Корреляция моментов и усилий с составляющими деформаций оболочки приведём к следующему виду:

$$N_1 = D_{11}\varepsilon_1 + D_{12}\varepsilon_2 + P_{11}\chi_1; \quad N_2 = D_{12}\varepsilon_1 + D_{22}\varepsilon_2 + P_{21}\chi_1; \\ M_1 = P_{11}\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_2 + B_{11}\chi_1; \quad M_2 = P_{21}\varepsilon_1 + P_{22}\varepsilon_2 + B_{21}\chi_1,$$

где с учётом влияния степени наводороживания материалов при концентрации λ материальные функции имеют вид:

$$D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) dz; \quad P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) z dz; \quad B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) z^2 dz.$$

Ввиду тройной нелинейности поставленной задачи, необходимо произвести построение разрешающих уравнений в линеаризованной форме с использованием двухшагового способа хронологических возмущений параметров. Физические зависимости представим в следующей линеаризованной форме [12]:

$$\begin{aligned} \delta e_{11} &= \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \lambda} \delta \lambda; \quad \delta e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \lambda} \delta \lambda; \\ \delta \varepsilon_1 &= \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}; \quad \delta \varepsilon_2 = k_2 \delta w; \quad \delta \chi_1 = -\delta w_{,11}; \\ \delta e_{11} &= \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1} - \alpha_3 \delta w_{,11}; \quad \delta e_{22} = k_2 \delta w. \end{aligned} \quad (11)$$

Зависимости приращений деформаций в точке через приращения деформаций средней поверхности $\delta \varepsilon_1$ и $\delta \varepsilon_2$ и кривизны средней поверхности $\delta \chi_1$, представляются следующим образом:

$$\delta e_{11} = \delta \varepsilon_1 + \alpha_3 \delta \chi_1; \quad \delta e_{22} = \delta \varepsilon_2.$$

Рассмотрим задачу, в которой процесс воздействия коррозионной водородной среды на оболочку завершён. Таким образом, не требуется дифференцирование по параметру λ в выражениях приращений деформаций (11). Это необходимо, когда наводороживание сопровождается возрастанием нагрузки, и как следствие – увеличением напряжений. Уравнения связи усилий с деформациями средней поверхности в приращениях примут вид:

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= D_{11} \delta \varepsilon_1 + D_{12} \delta \varepsilon_2 + P_{11} \delta \chi_1; \quad \delta N_2 = D_{12} \delta \varepsilon_1 + D_{22} \delta \varepsilon_2 + P_{21} \delta \chi_1; \\ \delta M_1 &= P_{11} \delta \varepsilon_1 + P_{12} \delta \varepsilon_2 + B_{11} \delta \chi_1; \quad \delta M_2 = P_{21} \delta \varepsilon_1 + P_{22} \delta \varepsilon_2 + B_{21} \delta \chi_1. \end{aligned} \quad (12)$$

Принимая во внимание осевую симметрию задачи загрузку оболочки внутренним равномерно распределенным давлением q , уравнения равновесия запишутся в виде:

$$\delta N_{1,1} = 0; \delta M_{1,1} - \delta Q_{1,1} + w_{,1} \delta N_1 + N_1 \delta w_{,1} = 0; \delta Q_{1,1} - k_2 \delta N_2 + \delta q = 0. \quad (13)$$

Проинтегрировав соотношения по толщине оболочки в соответствии с (5-7) и подставив выведенные решения для поперечной силы в уравнения равновесия, получаем три дифференциальных разрешающих уравнения в линеаризованной форме:

$$\begin{aligned} & C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] + D_{11}[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}] + \\ & + C_{12}(\lambda)k_2 \delta w + D_{12}k_2 \delta w_{,1} - C_{11}(\lambda)z \delta w_{,11} - P_{11} \delta w_{1,11} = 0; \\ \\ & C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] + P_{11}[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}] + \\ & + C_{12}(\lambda)zk_2 \delta w + P_{12}k_2 \delta w_{,1} - C_{11}(\lambda)z^2 \delta w_{,11} - B_{11} \delta w_{1,11} - \\ & - 2C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}] - C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] - \\ & - P_{11}[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + 2w_{,11} \delta w_{,11} + w_{,1} \delta w_{1,11}] - 2C_{12}(\lambda)zk_2 \delta w_{,1} - C_{12}(\lambda)zk_2 \delta w - \\ & - P_{12}k_2 \delta w_{,11} + 2C_{11}(\lambda)z \delta w_{,11} + C_{11}(\lambda)z^2 \delta w_{1,11} + B_{11} \delta w_{1,11} + \\ & + w_{,1} \{D_{11}[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] + D_{12}k_2 \delta w - P_{11} \delta w_{,11}\} + \\ & + \delta w_{,1} \{D_{11}[u_{,1} + 0,5w_{,1}^2] + D_{12}k_2 w - P_{11}w_{,11}\} = 0; \\ \\ & 2C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}] + C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] - \\ & - P_{11}[\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + 2w_{,11} \delta w_{,11} + w_{,1} \delta w_{1,11}] + \\ & + 2C_{12}(\lambda)zk_2 \delta w_{,1} + C_{12}(\lambda)zk_2 \delta w + P_{12}k_2 \delta w_{,11} - \\ & - 2C_{11}(\lambda)z \delta w_{,11} - C_{11}(\lambda)z^2 \delta w_{1,11} - B_{11} \delta w_{1,11} - \\ & - D_{12}k_2[\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}] + D_{22}k_2^2 \delta w - P_{21}k_2 \delta w_{,11} + \delta q = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Параметр B_{ij} зависит от концентрации водорода λ . Степень проникновения водородосодержащей среды по толщине получается из решения уравнения диффузии. Ввиду одномерности задачи по диффузии уравнение соответствует второму закону Фика, а решение может быть построено по двойным преобразованиям Фурье [13] (прямым и обратным):

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2},$$

где $D = const$ – коэффициент диффузии, t – текущее время.

$$\lambda(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\psi_k} K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}),$$

где функция $\psi_k(\gamma_k, r/R_2)$ зависит от направления воздействия водорода.

Расчёты производились посредством пакетов математических прикладных программ Maple и MATLAB. Ниже представлены результаты расчёта цилиндрической оболочки, работающей в агрессивной водородной среде с разной концентрацией от 0 до 0,05 %, с использованием предложенной модели.

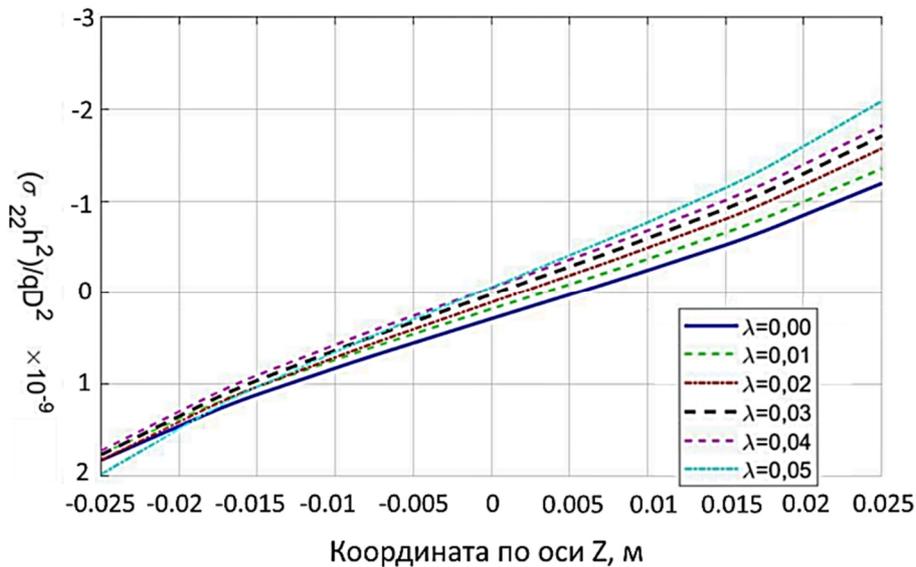


Рис. 2. Напряжения σ_{22} в точке края цилиндра (по оси z)

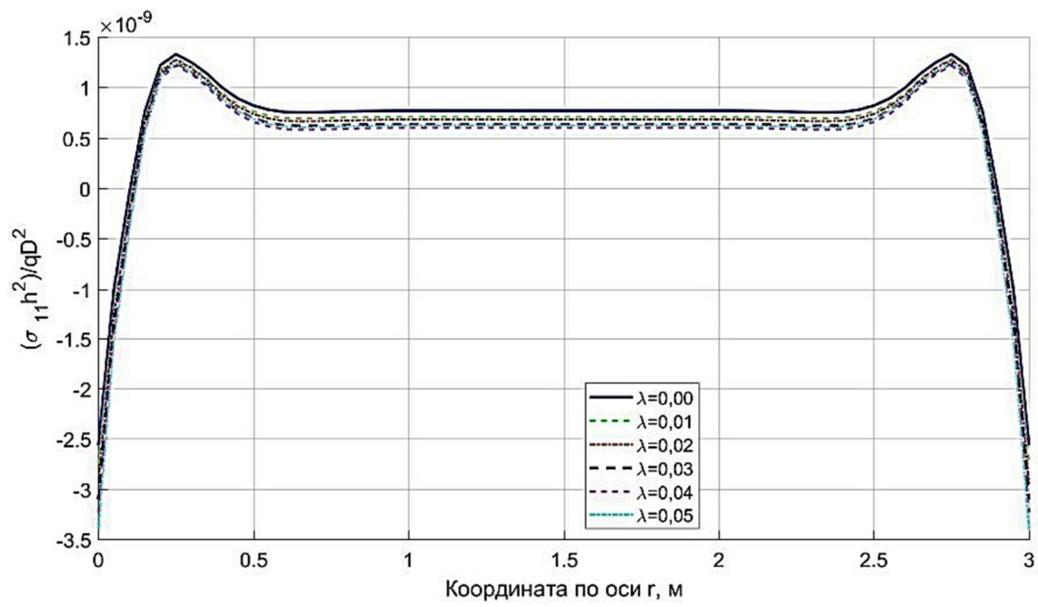


Рис. 3. Напряжения σ_{11} сверху вдоль образующей

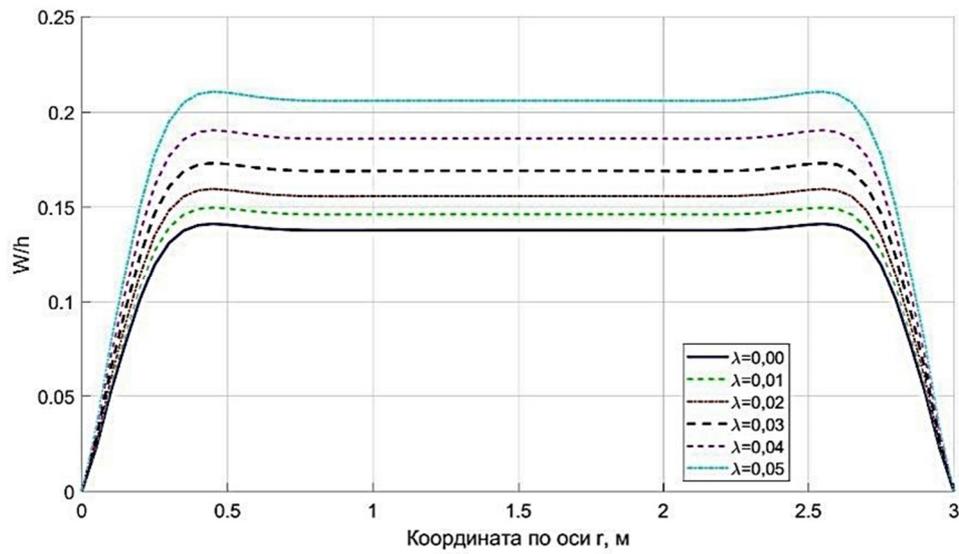


Рис. 4. Прогибы в оболочке

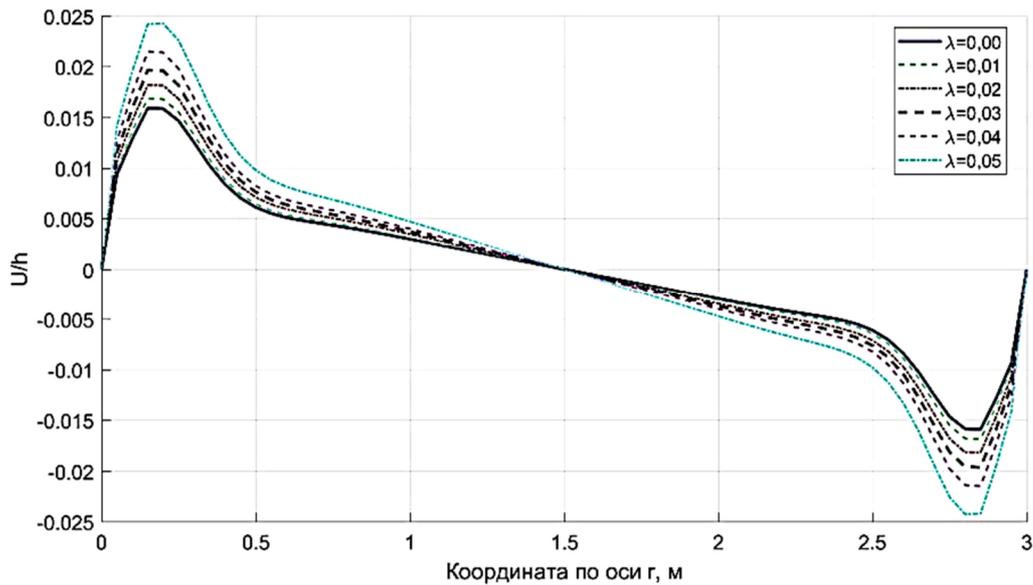


Рис. 5. Горизонтальные перемещения

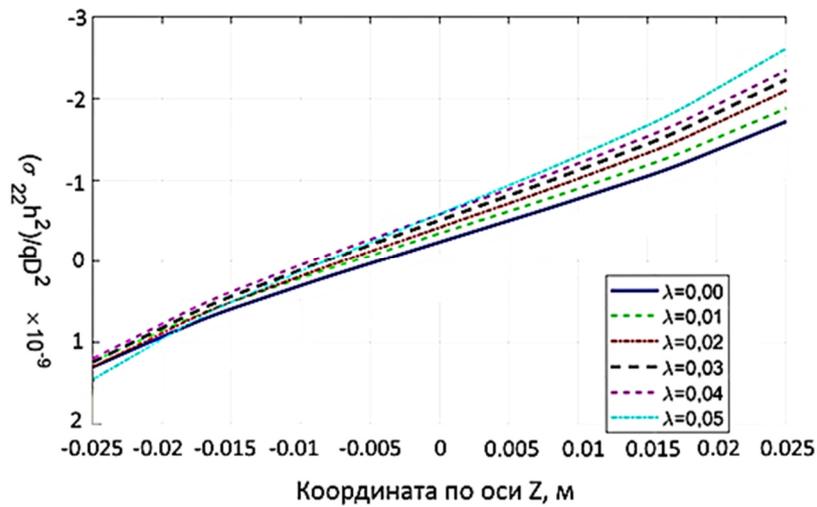


Рис. 6. Напряжения σ_{22} в точке края цилиндра (по оси z)

Также представлены некоторые результаты расчёта цилиндрической оболочки, эксплуатирующейся в агрессивной среде с разной концентрацией водорода, с использованием соотношений Л.А. Кирилловой и И.Г. Овчинникова [6].

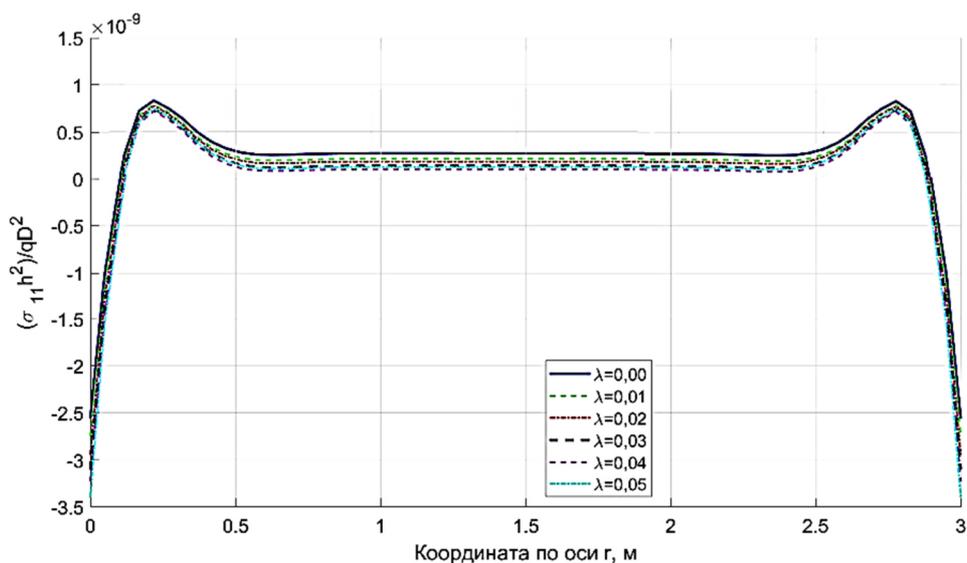


Рис. 7. Напряжения σ_{11} сверху вдоль образующей

Анализируя представленные графические зависимости, можно отметить наличие сходства качественных картин, рассчитанных по двум моделям. В результате исследования подтвердилась гипотеза, что в течение некоторого периода, происходит полярная смена характера напряженного состояния, составляющее для напряжений 20 % в сжатых и 24 % в растянутых зонах. Колебания в напряжениях, полученных в работах Овчинникова И.Г. и Кирилловой Л.А., достигают иных величин и составляют 15 % и 34 %, соответственно. Кроме того, по предлагаемой модели уточнение напряжений в результате учета влияния коррозионной водородной среды после нормализации напряженного состояния составляет 13 %, а в работе [9] эта величина достигает 30%.

Количественные и качественные отличия, полученные по результату сравнения, можно объяснить разными механизмами учета воздействия типа напряженного состояния. В данном подходе используется гибкий механизм учета разносопротивляемости, отражена высокая точность согласования предложенных гипотез с эмпирическими данными деформирования большого круга материалов при разных типах напряженного состояния. Модель оценки разносопротивляемости материалов в работе Л.А. Кирилловой и И.Г. Овчинниковым [6] основана на простейшей нелинейной теории упругости и выстроена с учетом одноосного

напряженного состояния, а поэтому имеет более грубый механизм оценки воздействия типа напряженного состояния на механические характеристики различных материалов.

Список литературы

1. Овчинников И.Г. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами / И.Г. Овчинников, В.В. Петров // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1983. С. 3-11.

2. Овчинников И.Г. Анализ экспериментальных данных по влиянию водорода при нормальных температурах на механические свойства металлов и сплавов к построению модели взаимодействия конструктивных элементов с водородом. Ч. 1. Проблема взаимодействия водорода на металлы и пути её решения. Закономерности проникания водорода в конструктивные элементы / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада. Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. 28 с.

3. Овчинников И.Г. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородосодержащей средой и её приложения / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада. // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. С. 12-16.

4. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации / А.А. Ильюшин. М. Л.: ОГИЗ, 1948. 376 с.

5. Кириллова Л.А. Напряжённо-деформированное состояние гибкой круглой пластины в водородосодержащей среде с учётом наведённой неоднородности. Дисс. к.т.н. Саратов, 1990. 163 с.

6. Кириллова Л.А. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию / Л.А. Кириллова, И.Г. Овчинников // Сарат. политехн. ин-т. Саратов, 1989. 15 с. Деп. В ВИНТИ 07.02.90, №698-В90.

8. Матченко Н.М. Определяющие отношения изотропных разносопротивляющихся сред. Ч. 1. Квазилинейные соотношения / Н.М. Матченко, Л.А. Толконников, А.А. Трещёв // Изв. РАН. МТТ. 1995. №1. С. 73-78.
9. Корнеев А.В. Учет влияния водородосодержащей среды на напряженно-деформированное состояние материалов на основе титановых сплавов / А.В. Корнеев, А.А. Трещев // Известия высших учебных заведений. Сер.: Строительство, 2009. №3-4. С. 23-29.
10. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. Л.: Судпромгиз, 1962. 332 с.
11. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. М.: Наука, 1966. 636 с.
12. Трещёв А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния: монография / А.А. Трещёв. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2013. 249 с.
13. Трещёв А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещёв. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 328 с.
14. Aslami M. Analytical solution for beams with multipoint boundary conditions on two-parameter elastic foundation. / Aslami M., Akimov P.A. // Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, Vol. 16, Issue 4. P. 668-677.
15. Mathieson C. Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with HRC connectors / Mathieson C., Roy K., Clifton G., Ahmadi A., Lim J.B.P. // Engineering Structures, 2019. P. 201.
16. Villegas L. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses / Villegas L., Moran R., Garcia J.J. // Engineering Structures, 2019, 184. P. 495-504.
17. Dong L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures // International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 173. P. 405-460.
18. Zok F.W. Periodic truss structures / Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 96. P. 184-203.

19. Tornhill C. London Bridge is rolling up: The spectacular Rolling Bridge that unfolds every Friday at noon. Daily Mail.22.09.2018.

20. Wenyu L.W. System reliability-based Direct Design Method for space frames with cold-formed steel hollow sections. // Engineering Structures, 2018, Vol. 166. P. 79-92.

Трещев Александр Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций Тульского государственного университета
Кузнецова Виолетта Олеговна - аспирант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций Тульского государственного университета

УДК 612.843.7, 004.5

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЫ
КАК СПОСОБ ВЕРНУТЬ ЗРЕНИЕ**

А.И. Отченашенко^{1}, В.В. Корнеева², М.С. Букша³*

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

(Московский инженерно-физический институт),

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

²*Воронежский государственный технический университет,*

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

³*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

Зрительный кортикальный протез (ЗКП) уже давно применяется в качестве стратегии восстановления зрения, исходя из предположения, что перцепты небольших пятен света, создаваемые при электрической стимуляции зрительной коры (фосфены), будут объединяться в когерентные зрительные формы, подобно пикселям на видеоэкране. Была протестирована альтернативная стратегия, в которой фигуры создавались с помощью стимулирующих электродов. Как у зрячих, так и у слепых участников эксперимента динамическая стимуляция позволяла точно распознавать буквы. Слепые участники быстро представляли и узнавали до 86 букв в минуту. Эти результаты показывают, что с помощью данной стратегии мозг может производить когерентное восприятие визуальных форм.

Ключевые слова: зрительный кортикальный протез, фосфены, динамическая электро-стимуляция, зрительная кора, восстановление зрения, имплантаты

DYNAMIC STIMULATION OF THE VISUAL CORTEX AS A WAY TO RESTORE VISION

A.I. Otchenashenko^{1}, V.V. Korneeva², M.S. Buksha³*

¹*National Research Nuclear University «MEPHI»*

(Moscow Engineering Physics Institute),

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

²*Voronezh State Technical University,*

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

³*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*

Visual cortical prosthesis (VCR) it has long been proposed as a strategy for restoring vision, based on the assumption that the percepts of small spots of light created by electrical stimulation of the visual cortex (phosphenes) will combine into coherent visual forms, like pixels on a video screen. An alternative strategy was tested in which shapes were created using stimulating electrodes. In both sighted and blind participants, dynamic stimulation made it possible to accurately recognize letters. Blind participants quickly imagined and learned up to 86 letters per minute. These results show that using this strategy, the brain can produce a coherent perception of visual forms.

Keywords: visual cortical prosthesis, phosphenes, dynamic electrical stimulation, visual cortex, vision restoration, implants

Введение. У большинства людей с приобретенной слепотой повреждены только глаза или зрительные нервы. Этот факт был положен в разработку ЗКП – устройства, которое будет, минуя глаза и зрительный нерв, передавать визуальную информацию непосредственно в зрительную кору [1]. ЗКП основывается на том, что стимуляция зрительной коры электрическим током может вызвать восприятие небольшой вспышки света, известной как фосфен [2]. Из-за

ретинотопической организации зрительной коры имплантация множества электродов в разные места кортикальной карты позволяет создавать множество фосфенов, причем каждый электрод создает фосфен в определенном месте поля зрения [3]. Последние достижения в области биомедицинской инженерии привели к созданию устройств с беспроводным питанием и управлением [4], которые могут быть имплантированы в зрительную кору, это позволило по-новому взглянуть на ЗКП [5].

Но несмотря на эти технические достижения, фундаментальные принципы остались неизменны: отдельные фосфены аналогичны пикселям на компьютерном дисплее, они могут быть легко объединены для получения когерентного изображения [6].

При тестировании ЗКП стимуляция нескольких электродов производила восприятие только нескольких изолированных фосфенов, которые не объединялись в когерентные формы [7]. Чтобы это преодолеть, был разработан альтернативный подход, использующий динамическую активацию последовательности электродов. Данная стратегия может быть объяснена по аналогии с трассировкой букв на ладони (рис. 1). Чтобы передать букву «Z», нужно нажать на ладонь, якобы рисуя букву «Z» (рис. 1, А). Однако эта техника основана на восприятии прикосновения без когерентной формы. В качестве альтернативы можно было бы динамически перемещать указатель, рисуя символ «Z» (рис. 1, В). Данная техника мгновенно создает когерентный буквенный перцепт [8].

Парадигма электростимуляции, используемая в существующих ЗКП, аналогична подходу многоканального зонда: стимулируется несколько электродов, что приводит к некогерентному восприятию (рис. 1, С). Новая стратегия аналогична рисованию букв на ладони, за исключением того, что искомая буква формируется на поверхности кортекса с помощью стимулирующих электродов (рис. 1, D). Электроды расположены точно, что требует дополнительных манипуляций для стимуляции коры головного мозга. Это достигается с помощью метода, известного как «управление током»: если ток проходит через два соседних электрода, виртуальный электрод создается посередине между ними [9].

Изменение величины тока, подаваемого на соседние электроды, позволяет расположить виртуальный электрод в разных местах на отрезке между двумя физическими электродами [10].

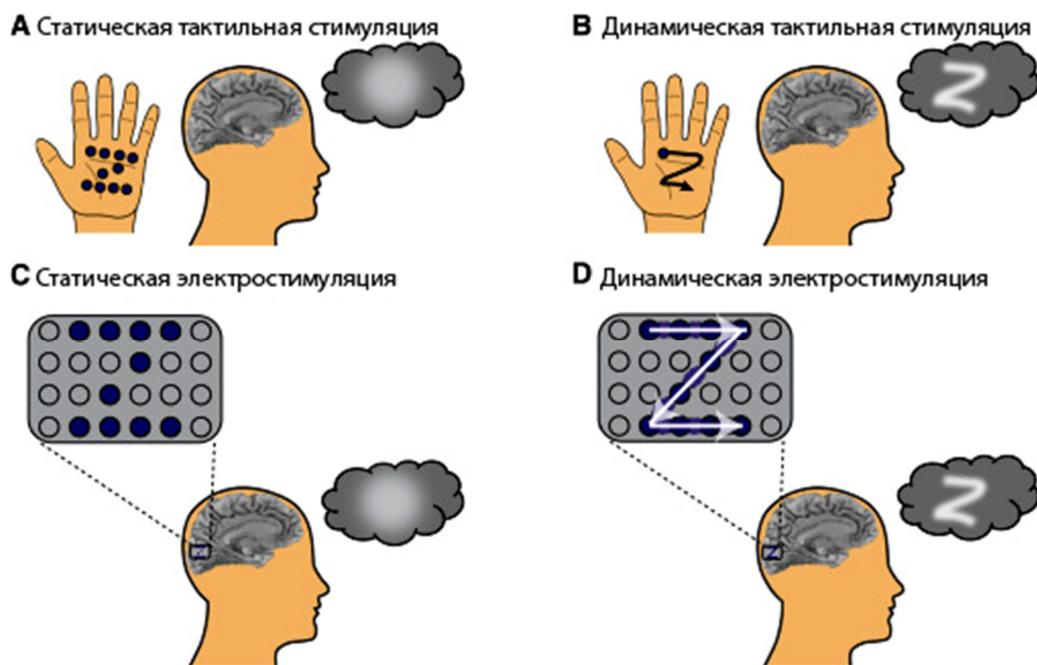


Рис. 1. Примеры стимуляций. (А) Статическая тактильная стимуляция. (В) Динамическая тактильная стимуляция. (С) Статическая электростимуляция. (D) Динамическая электростимуляция

Результаты и обсуждение

Динамическое управление током сочетает в себе управление с динамической стимуляцией. Чтобы изучить эффективность управления током в зрительной коре, провели тестирование слепого человека, которому были имплантированы электроды на медиальную стенку затылочной доли вблизи кальциновой борозды (рис. 2, А). На два соседних электрода были поданы сигналы длительностью 100 мс и частотой 60 Гц, варьируя величину тока, подаваемого на каждый электрод (рис. 2, В и С). Участник сообщил о своем восприятии, нарисовав предполагаемое местоположение фосфена на сенсорном экране компьютера [11].

Была использована процедура калибровки для определения тока, необходимого для получения фосфенов, в результате чего исходные значения тока составили 4 мА для электрода F03 и 3,6 мА для электрода F01 [12].

В первом состоянии стимуляции последовательность импульсов длительностью 100 мс с базовым током 3,6 мА подавалась на первый электрод (F01), при этом на электрод F03 ток не подавался (F01: 100 %; F03: 0 %). Во время подачи импульсной последовательности участник сообщал о своем восприятии одного фосфена, расположенного в правом верхнем зрительном поле, и записывал его местоположение на сенсорном экране. В десяти испытаниях среднее местоположение отчета находилось в координатах (азимут 13,3°; высота 2,1°). Чтобы охарактеризовать изменчивость местоположения в разных испытаниях, был сгенерирован эллипс, содержащий все сообщенные местоположения фосфена (рис. 2, D). Длина большой и малой осей эллипса составляла (1,0°; 0,5°).

В пятом состоянии стимуляции базовый ток 4 мА подавался только на второй электрод (F03), а на F01 ток не подавался (F01: 0%; F03: 100%). В соответствии с известной ретинотопической организацией зрительной коры, фосфены, создаваемые электродом F03, располагались кучнее, чем фосфены F01, с центром (5,4°; 2,2°) и разбросом (0,9°; 0,6°).

В промежуточных условиях ток подавался в различных пропорциях к двум физическим электродам для создания виртуальных электродов, расположенных между двумя физическими электродами.

Во втором состоянии 80 % базового тока подавалось на электрод F01, а 50% базового тока подавалось на электрод F03. Как предполагалось, это генерировало фосфены, расположенные между физическими электродами, но ближе к электроду F01, с центром (11,4°; 2,1°) и разбросом (0,5°; 0,3°).

В третьем состоянии эквивалентные токи подавались на два электрода (F01: 70 %; F03: 70 %), и полученные фосфены располагались почти точно посередине между электродами F01 и F03, с центром (9,8°; 2,1°) и разбросом (0,4°; 0,3°).

В четвертом состоянии (F01: 50 %; F03: 80 %) фосфены были промежуточными между двумя физическими электродами, но ближе к F03, с центром (8,0°; 2,2°) и разбросом (0,5°; 0,3°).

При построении графика (рис. 2, D), фосфены, созданные стимуляцией физического и виртуального электродов, лежали на горизонтальной линии на

высоте 2°, без перекрытия между фосфенами, созданными стимуляцией двух физических и трех виртуальных электродов. Это предполагает, что фосфены могут быть созданы в дополнительных промежуточных местах путем манипулирования прикладываемым током. Если ток быстро изменяется во времени, это способствует восприятию непрерывно движущегося фосфена [13].

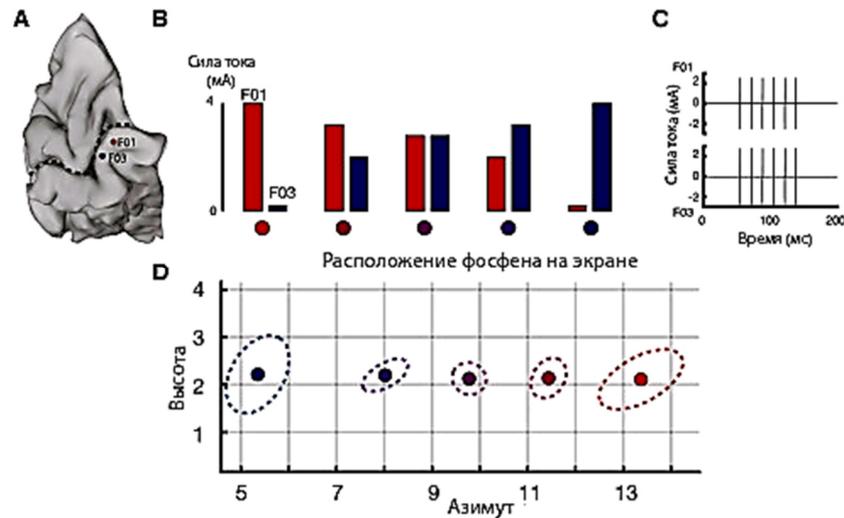


Рис. 2. Эффективность динамической электростимуляции у слепых. (А) Вид модели кортикальной поверхности затылочной доли (пунктирная линия указывает на кальциновую борозду). Два электрода показаны в виде красной и синей точек (обозначены F01 и F03). (В) Управление током осуществлялось путем подачи переменного тока на два электрода. В первом условии максимальный ток подавался на электрод F01 и не подавался на электрод F03; в последующих условиях количество тока, подаваемого на электрод F01, уменьшалось, а количество тока, подаваемого на электрод F03, увеличивалось, пока в пятом условии на электрод F01 ток не подавался, а на электрод подавался F03 максимальный ток. Цветные круги под каждым условием соответствуют местоположениям фосфена в (D). (С) В каждом случае ток подавался в одной серии импульсов длительностью 100 мс с 6 импульсами на серию (частота импульсов 60 Гц). Показана последовательность импульсов для третьего условия стимуляции в (В) с эквивалентными амплитудами тока для F01 и F03. Для других условий амплитуда тока, подаваемого на электроды, отличалась, но время следования импульсов было одинаковым. (D) Участник использовал сенсорный экран, чтобы показать местоположение визуального восприятия, возникающего в результате каждой стимуляции. Было проведено десять испытаний. Цветной кружок показывает среднее местоположение фосфенов; пунктирная линия показывает 95%-ный пространственный доверительный интервал. Цвета каждого круга и пунктирной линии соответствуют условным цветам, показанным в (В)

Чтобы проверить эффективность динамической стимуляции в сочетании с токовым управлением, было использовано пять электродов для стимуляции, расположенных вдоль язычной извилины (рис. 3, А) [14]. В течение 400 мс на каждый электрод последовательно подавалась последовательность импульсов

частотой 120 Гц с постепенно увеличивающимся, а затем уменьшающимся током (рис.3, В), чтобы создать виртуальный электрод, непрерывно движущийся вдоль извилины. Участник сообщил, что этот паттерн стимуляции производит перцепт «линия, которую рисуют» с оценкой непрерывности 8 из 10, где 1 – дискретные фосфены, а 10 – совершенно непрерывная линия. Участник сообщил, что линия начинается с $(12,9^\circ; 2,7^\circ)$ и заканчивается на $(3,2^\circ; 1,8^\circ)$, как показано на рис. 3, С [15].

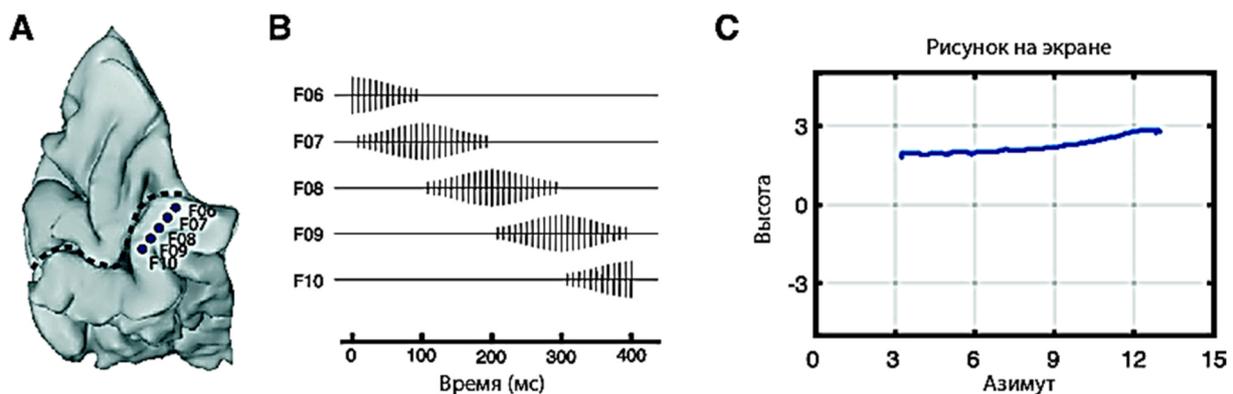


Рис. 3. Эффективность динамической электростимуляции у слепых. (А) Медиальный вид модели кортикальной поверхности затылочной доли участника (пунктирная линия указывает на кальциновую борозду; тот же участник, что и на рис. 2). Пять электродов показаны в виде синих точек (буквы показывают метки электродов). (В) Динамическое управление током осуществлялось путем подачи электрического тока на электроды, который изменяли во времени. (С) Участник сообщил о восприятии точки, пересекающей поле зрения в горизонтальном направлении

Также данный эксперимент был проведен со зрячими участниками. В примере, показанном на рис. 4, массив из 24 электродов был имплантирован на медиальную поверхность затылочной доли (участник YBN; рис. 4, А). Рецептивные поля (РП) были упорядоченно организованы в верхнем правом зрительном поле (рис. 4, В). На основе отображенных РП, были разработаны динамические последовательности стимуляции, соответствующие четырем различным буквоподобным формам (рис. 4, С). После стимуляции участник смог легко воспроизвести каждую из четырех букв на сенсорном экране, и было замечено поразительное соответствие между предсказанной и реальной формой воспринимаемых букв (рис. 4, D). У зрячего участника YAУ динамическое управление током использовалось для передачи буквы «Z» (рис. 4, H) [16].

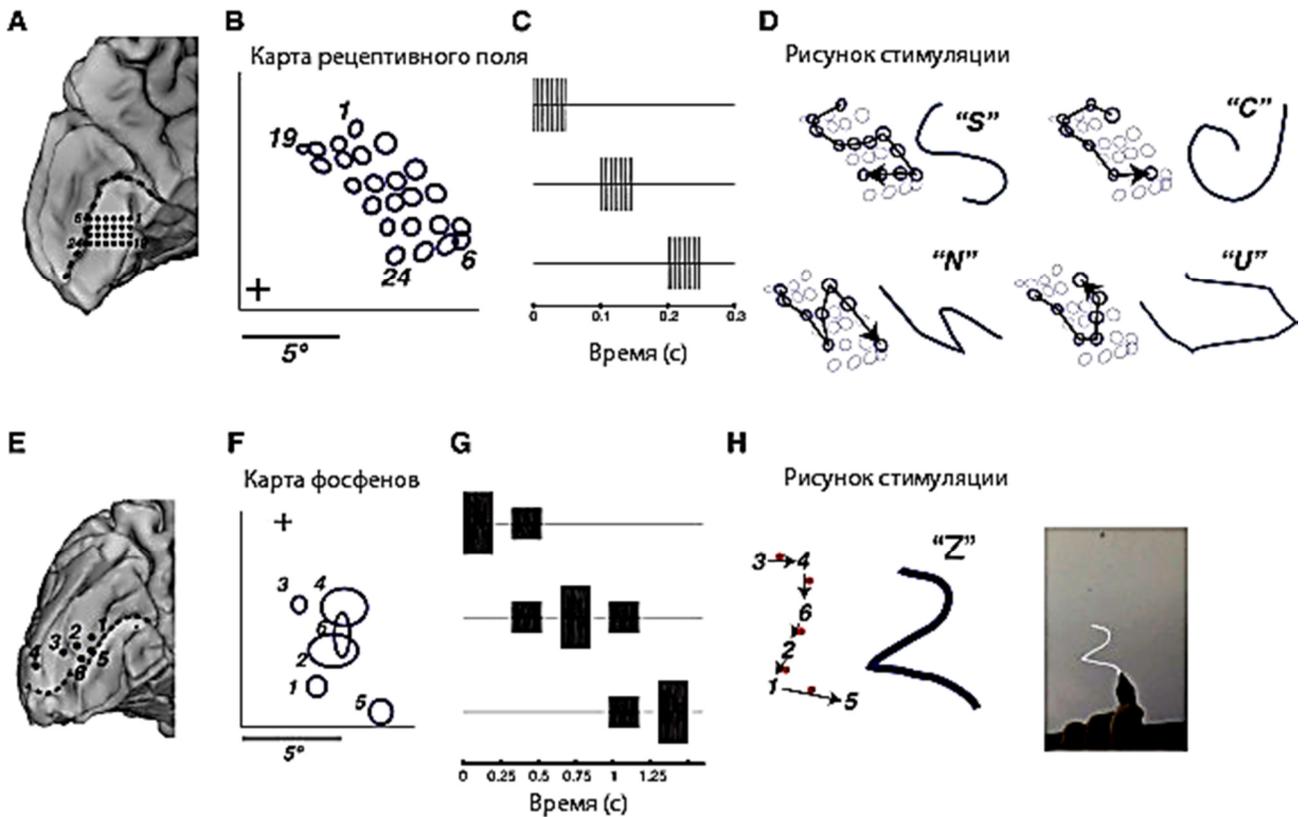


Рис. 4. Эффективность динамической электростимуляции у зрячих.

(А) Вид левой затылочной доли зрячего участника YBN. Синими кружочками показаны 24 электрода, содержащиеся в сетке, имплантированные ниже кальциновой борозды (пунктирная черная линия). Черные цифры обозначают электроды и соответствуют фосфенам в (В). (В) Для создания карт рецептивного поля участник фиксировал фосфены во время представления картографических стимулов. Синие кружочки показывают расположение центров рецептивного поля для каждого электрода относительно точки фиксации (+). (С) Импульсная диаграмма динамической стимуляции (без управления электрическим током). Показаны временные интервалы импульсов поданных на первые три электрода в последовательности; импульсы подавались с одинаковым временным интервалом. Для каждого электрода использовался ток стимуляции, который производил фосфен, когда этот электрод стимулировался током в диапазоне от 1,2 до 1,5 мА в зависимости от электрода. (D) Динамическая стимуляция выбранных электродов использовалась для формирования зрительных восприятий четырех различных буквенных форм. Для каждой буквенной формы слева показаны стимулируемые электроды (обведенные кружки) и направление временной последовательности стимуляции (стрелка). Справа от каждого рецептивного поля фактический рисунок зрительного восприятия участника. (Е) Медиальный вид левой затылочной доли зрячего участника YAY. Синими кружочками показано расположение стимулированных электродов относительно кальциновой борозды (пунктирная черная линия). (F) Расположение отдельных фосфенов. Участник рисовал каждый фосфен на сенсорном экране (жирные эллипсы, пронумерованные соответствующим электродом). (G) Схема импульсного динамического воздействия. Исходные токи стимуляции для каждого электрода составляли от 0,7 до 1,5 мА. (H) Фосфеновая карта использовалась для построения последовательности стимуляции для получения визуального восприятия буквы «Z». Черные стрелки показывают временную последовательность стимулированных электродов (черные цифры) и виртуальных электродов, расположенных между физическими электродами (красные точки). Участник нарисовал узор, который он увидел, на сенсорном экране (синяя линия, посередине). Справа: запись участником увиденного символа

У слепых участников стимулировали пять электродов, имплантированных на медиальную стенку зрительной коры [17]. При отдельной стимуляции каждый электрод производил дискретный фосфен (рис. 5, С). Используя карту фосфенов этого участника, были разработаны семь различных последовательностей динамической стимуляции [18]. По этой карте участник мог воспроизвести буквоподобные формы, соответствующие каждой последовательности (рис. 5, D). Чтобы оценить правильность воспринимаемой буквы, участник получал случайно чередующиеся стимуляции, рисуя воспринимаемый паттерн после каждого испытания. Чтобы количественно оценить этот эффект, рисунки были квантованы, коррелированы и подвергнуты многомерному масштабированию с последующей кластеризацией k-средних. 23 из 28 (82%) букв были помещены в правильный кластер ($p < 10^{-5}$ из бутстрэп-анализа, в котором последовательности были случайным образом перемешаны) [19].

В качестве более прямой проверки различий в восприятиях, создаваемых различными последовательностями стимуляции, был проведен дополнительный эксперимент, в котором участника попросили вербально идентифицировать последовательности стимуляции, представленные в случайном порядке, выбранные из набора пяти паттернов. Участник правильно определил 14 из 15 паттернов (93% правильных в сравнении с 20% вероятности, $p = 10^{-8}$).

У слепого участника 03-281 стимулировали шесть электродов, имплантированных на медиальную стенку зрительной коры (рис. 6). При отдельной стимуляции каждый электрод вырабатывал отдельный фосфен [20]. Используя карту фосфенов этого участника, были разработаны четыре различных последовательности динамической стимуляции. По этой карте участник мог воспроизвести буквы, соответствующие каждой последовательности. Чтобы оценить надежность, участник получал повторные стимуляции различных динамических последовательностей, рисуя воспринимаемый паттерн после каждого испытания. Рисунки были квантованы, коррелированы и подвергнуты многомерному масштабированию с последующей кластеризацией k-средних. 36 из 40 (90%) букв были помещены в правильный кластер ($p < 10^{-5}$ из бутстрэп-анализа,

в котором последовательности были случайным образом перемешаны). Участник также устно идентифицировал каждый паттерн после испытания. Участник правильно определил 37 из 40 паттернов, представленных в случайной последовательности (93% против 25% вероятности, $p = 10^{-15}$). Участник недвусмысленно отождествлял воспринимаемые паттерны с буквами, например, отвечая «N как в Нэнси» для паттерна стимуляции N.

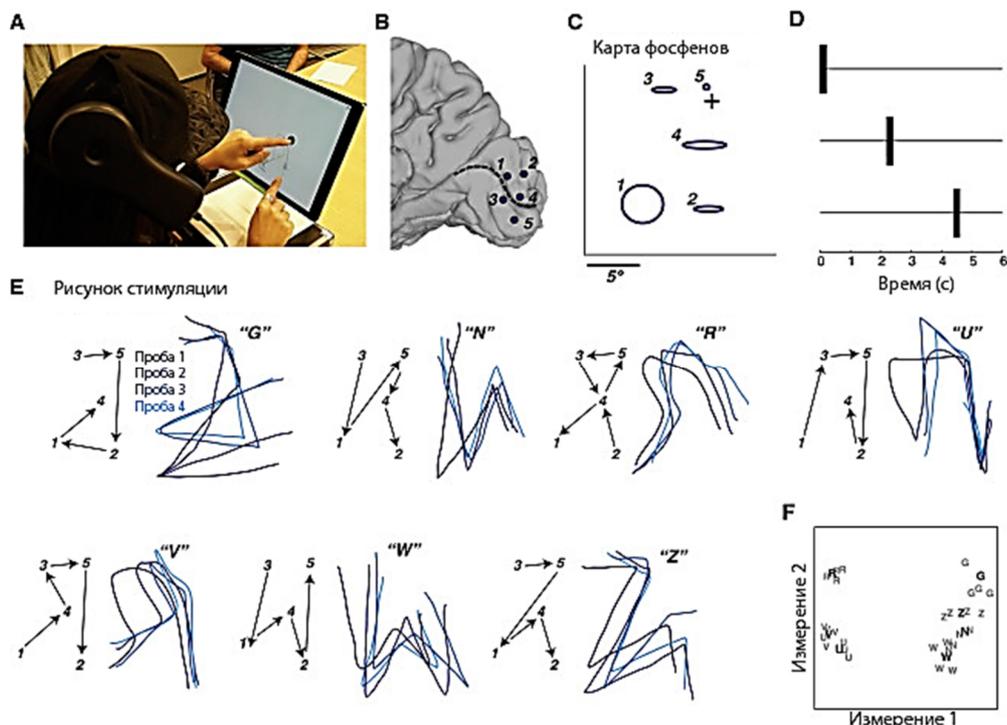


Рис. 5. Тестирование динамической электростимуляции у слепых участников. (А) Участник поместил указательный палец левой руки на точку тактильной фиксации в середине сенсорного экрана и использовал указательный палец правой руки для отслеживания визуального восприятия на сенсорном экране. (В) Модель поверхности правой затылочной доли участника. Пунктирная линия показывает кальциновую борозду; синие кружочки показывают расположение электродов и их номера. (С) Синие эллипсы показывают рисунок фосфенов, созданных стимуляцией отдельных электродов, с номерами, соответствующими электродам в (В). Перекрестие показывает расположение точки тактильной фиксации. (D) Диаграмма импульсов динамической стимуляции. Показаны временные интервалы импульсов к первым трем электродам; импульсы к электродам произошли с одинаковым временным интервалом. Ток стимуляции для всех электродов составлял 2 мА. (Е) Семь различных буквоподобных форм, создаваемых семью различными динамическими паттернами стимуляции. Слева, для каждой фигуры: временная последовательность стимуляции (электроды обозначены цифрами, соединенными черными стрелками). Справа, для каждой фигуры: рисунки участников с каждым паттерном стимуляции. Каждая линия иллюстрирует отдельное испытание (в случайном порядке), окрашены в различные оттенки синего для наглядности. Буква в кавычках – эталон. (F) Количественная оценка рисунков, полученных участником для каждого испытания каждого паттерна стимуляции, с использованием многомерного масштабного анализа. Каждая буква соответствует одному испытанию соответствующего паттерна стимуляции.

Буквы жирным шрифтом показывают центроид каждого кластера на основе анализа методом k-средних

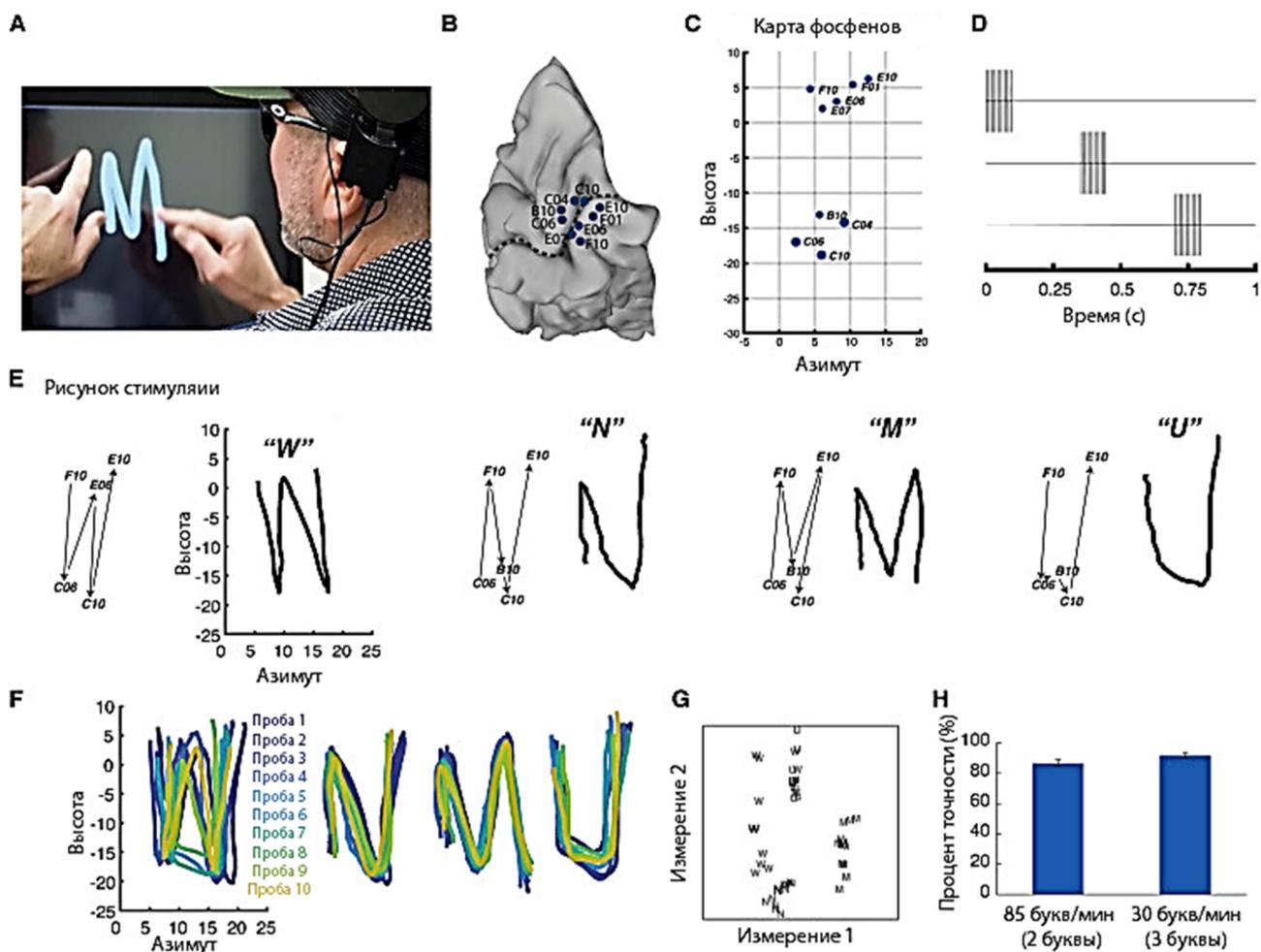


Рис. 6. Тестирование динамической электростимуляции у слепого участника 03-281. (А) Участник поместил указательный палец левой руки на точку тактильной фиксации и использовал указательный палец правой руки для отслеживания визуального восприятия на сенсорном экране. (В) Модель поверхности правой затылочной доли участника. Пунктирная линия показывает кальциновую борозду; круги показывают расположение электродов и метки. (С) Синие кружочки показывают положение фосфенов, созданные стимуляцией отдельных электродов, с метками, соответствующим электродам в (В). (Д) Диаграмма импульсов динамической электростимуляции. Показаны временные интервалы импульсов первых трех электродов в последовательности; импульсы к последовательным электродам подавали с одинаковым временным интервалом. Токи варьировались от 3,5 до 5,8 мА на каждый электрод. (Е) Четыре буквоподобные формы, созданные четырьмя различными динамическими моделями стимуляции. Слева, для каждой фигуры: временная последовательность стимуляции (электроды обозначены цифрами, соединенными черными стрелками). Справа, для каждой фигуры: рис. участника. В кавычках – эталон. (Ф) Рисунки десяти различных испытаний каждого паттерна стимуляции; каждое испытание обозначается другим цветом. (Г) Количественная оценка рисунков, полученных участником для каждого испытания каждого паттерна стимуляции с использованием многомерного масштабного анализа. Каждая буква соответствует одному испытанию соответствующего паттерна стимуляции. Буквы жирным шрифтом показывают центроид каждого кластера на основе анализа методом k-средних. (Н) Точность идентификации формы при двух различных скоростях представления. Левый график: две формы (нисходящая линия и восходящая линия) были представлены в случайном порядке со скоростью 85 форм в минуту и устно идентифицированы участником. Правый график: три формы («С», «U», «обратное С») были представлены со скоростью 30 форм в минуту. Столбики ошибок показывают 95% доверительный интервал от биномиального распределения

Когда слепой участник 03-281 смог уверенно распознавать паттерны стимуляции, были проведены эксперименты, целью которых было узнать: насколько быстро могут быть доставлены различные паттерны (рис. 6, Н). В первом эксперименте со скоростью стимуляции электроды стимулировались таким образом, что они производили восприятие линии, проведенной либо сверху вниз, либо снизу вверх. Время стимуляции для каждой последовательности составляло 200 мс, за которым следовало окно в 500 мс, позволяющее участнику устно сообщить о форме как «вниз» или «вверх» (86 форм в минуту). В последовательности из 30 испытаний участник точно определил 26 форм (87% верно по сравнению с вероятностью 50%, $p = 10^{-4}$).

Во втором эксперименте с частотой стимуляции электроды стимулировались таким образом, что они производили одну из трех форм: «С», «U» или «обратное С». Время стимуляции составляло 700 мс, за которым следовало окно ответа 1300 мс (30 форм в минуту). В последовательности из 36 исследований 33 формы были правильно идентифицированы (92% правильных по сравнению с вероятностью 33%, $p = 10^{-12}$).

Выводы. Данный эксперимент – продолжение других экспериментов стимуляции зрительной коры человека, которые проводятся уже несколько десятилетий [21]. Динамическая электростимуляция также основана на предыдущих стратегиях по созданию нейростимуляций в нейропротезировании человека, направленных на «считывание» нейронной информации. Например, современная электростимуляция применяется как в имплантатах сетчатки, кохлеарных имплантатах, так и в глубокой стимуляции мозга [22].

Достижения в области технологии, например: электростимуляция сетками электродов высокой плотности, размещенными на кортикальной поверхности; стимуляция внутри коры головного мозга; неэлектрическая стимуляция оптогенетическими [23], магнитотермическими [24], или ультразвуковыми методами [25], -обещают резкое улучшение способности стимулировать кору головного мозга человека. Как парадигма стимуляции общего назначения, динамическая электростимуляция может быть использована в сочетании с любой из

этих технологий, чтобы помочь восстановить полезную зрительную функцию слепых людей и обеспечить более эффективное использование других кортикальных протезов.

Список литературы

1. Аргалл Б.Д., Саад З.С., Бошан М.С. Упрощенное межсубъектное усреднение на кортикальной поверхности с помощью SUMA. Гм. BrainMapp. 27, 2006. С. 14-27.

2. Мирошник Р.М., Пезарис Дж. Современные подходы к визуальным протезам. Mil. Med. Res. 6, 19. 2019.

3. Никетегад С., Муралидхаран А., Патель У., Дорн Дж. Д., Бонелли Л., Гринберг Р.Дж., Пуратян Н. Восприятие фосфена и безопасность хронических зрительных стимуляций коры головного мозга слепого. J. Neurosurg. <https://doi.org/10.3171/2019.3.JNS182774>. 2019.

4. Бак М., Гирвин Дж. П., Хамбрехт Ф.Т., Куфта К.В., Лёб Г.Е., Шмидт Э.М. Визуальные ощущения, возникающие при внутрикортикальной микро-стимуляции затылочной коры человека. Med. Биол. Англ. Comput. 28, 1990. С. 257-259.

5. Байелер М., Рокем А., Бойнтон Г.М., Файн И. Учимся снова видеть: биологические ограничения корковой пластичности и последствия для технологий восстановления зрения. J. NeuralEng. 14, 051003. 2017.

6. Боскинг У.Х., Бошамп М.С., Йошор, Д. Электрическая стимуляция зрительной коры головного мозга: актуальность для развития визуального кортикального протезирования. Annu. Rev. Vis. Sci. 3, 2017. С. 141-166.

7. Боскинг У.Х., Сан П., Озкер М., Пей Х., Фостер Б.Л., Бошамп М.С., Йошор Д. Насыщение размера фосфена с увеличением текущих уровней, доставляемых в зрительную кору человека. J. Neurosci. 37, 2017. С. 7188-7197.

8. Боскинг У.Х., Фостер Б., Сан П., Бошан М.С., Йошор Д. Правила, регулирующие восприятие множественных фосфенов наблюдателями. 2018. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/302547>.
9. Бриндли, Г.С. Эффекты электростимуляции зрительной коры. Гм. *Neurobiol.* 1, 1982. С. 281-283.
10. Бриндли Г.С., Левин В.С. Ощущения, возникающие при электростимуляции зрительной коры. *J. Physiol.* 196, 1968. С. 479-493.
11. Чен Р., Ромеро Г., Кристиансен М., Мор А., Аникеева П. Беспроводная магнитотермическая стимуляция глубокого мозга. *Science* 347, 2015. С. 1477-1480.
12. Кристи Б.П., Эшмонт К.Р., Хаус П.А., Грегер Б. Подходы к протезу коркового зрения: значение размера и размещения электродов. *J. NeuralEng.* 13, 025003. 2016.
13. Сох R.W. AFNI: программа для анализа и визуализации функциональных магнитно-резонансных нейровизуальных изображений. *Comput. Биомед. Res.* 29, 1996. С. 162-173.
14. Дейл А.М., Фишл Б., Серено М.И. Анализ кортикальной поверхности. I. Сегментация и реконструкция поверхности. *Neuroimage* 9, 1999. С. 179-194.
15. Дэвис Т.С., Паркер Р.А., Хаус П.А., Бэгли Э., Венделкен С., Норманн Р.А., Грегер Б. Пространственные и временные характеристики микроstimуляции V1 при хронической имплантации массива микроэлектродов в поведение макаки. *J. NeuralEng.* 9, 2012. 065003.
16. Дейссерот К. Оптогенетика: 10 лет микробных опсинов в нейробиологии. *Nat. Neurosci.* 18, 2015. С. 1213-1225.
17. Дейоу Э.А., Левин Дж., Доти Р.В. Оптимальные стимулы для обнаружения внутрикортикальных токов, применяемых к полосатой коре головного мозга бодрствующих макак. Материалы ежегодной международной конференции IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE), 1989.

18. Добель У.Х., Младейовский М.Г., Эванс Дж.Р., Робертс Т.С., Гирвин Дж.П. Чтение «шрифтом Брайля» слепым добровольцем с помощью зрительной стимуляции коры головного мозга. *Nature* 259, 1976. С. 111-112.
19. Дамм Г., Фэллон Дж. Б., Уильямс К.Э., Шивдасани М.Н. Виртуальные электроды по управлению током в протезах сетчатки. *Инвестировать. Офтальмол. Vis. Sci.* 55, 2014. С. 8077-8085.
20. Фирст Дж.Б., Кох Д.Б., Даунинг М., Литвак Л. Управление током создает дополнительное восприятие высоты звука у взрослых реципиентов кохлеарных имплантатов. *Ототол. Neurotol.* 28, 2007. С. 629-636.
21. Фишл Б., Серено М.И., Дейл А.М. Анализ кортикальной поверхности. II: раздувание, выравнивание и система координат на основе поверхности. *Neuroimage* 9, 1999. С. 195-207.
22. Гросс Р.Э., Макдугал М.Э. Технологические достижения в хирургическом лечении двигательных нарушений. *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.* 13, 2013. С. 371.
23. Калкман Р.К., Бриайр Дж.Дж., Фрайнс Дж.Х. Стратегии стимуляции и конструкция электродов в компьютерных моделях электрически стимулированной улитки: обзор существующей литературы. *Сеть* 27, 2016. С. 107-134.
24. Ходаголы Д., Гелинас Дж.Н., Тесен Т., Дойл В., Девинский О., Маллиарас Г. Г., Бужаки Г. *NeuroGrid*: запись потенциалов действия с поверхности мозга. *Nat. Neurosci.* 18, 2015. С. 310-315.
25. Клауке С., Герц М., Рейн С., Хель Д., Томас У., Экхорн Р., Бреммер Ф., Вахтлер Т. Стимуляция беспроводным внутриглазным эпиретинальным имплантатом вызывает зрительное восприятие у слепых людей. *Офтальмол. Vis. Sci.* 52, 2011. С. 449-455.

References

1. Argall B.D., Saad Z.S., Beauchamp M.S. Simplified intersubject averaging on the cortical surface using SUMA. *Hum. Brain Mapp.* 27, 2006. P. 14-27.

2. Mirochnik R.M., Pezaris J.S. Contemporary approaches to visual prostheses. *Mil. Med. Res.* 6, 2019. P. 19.
3. Niketeghad S., Muralidharan A., Patel U., Dorn J.D., Bonelli L., Greenberg R.J., Pouratian N. Phosphene perceptions and safety of chronic visual cortex stimulation in a blind subject. *J. Neurosurg.* <https://doi.org/10.3171/2019.3.JNS182774>. 2019.
4. Bak M., Girvin J.P., Hambrecht F.T., Kufta C.V., Loeb G.E., Schmidt E.M. Visual sensations produced by intracortical microstimulation of the human occipital cortex. *Med. Biol. Eng. Comput.* 28. 1990. P. 257-259.
5. Beyeler M., Rokem A., Boynton G.M., Fine I. Learning to see again: biological constraints on cortical plasticity and the implications for sight restoration technologies. *J. Neural Eng.* 14, 051003. 2017.
6. Bosking W.H., Beauchamp M.S., Yoshor D. Electrical Stimulation of Visual Cortex: Relevance for the Development of Visual Cortical Prosthetics. *Annu. Rev. Vis. Sci.* 3. 2017. P. 141-166.
7. Bosking W.H., Sun P., Ozker M., Pei X., Foster B.L., Beauchamp M.S., Yoshor D. Saturation in Phosphene Size with Increasing Current Levels Delivered to Human Visual Cortex. *J. Neurosci.* 37, 2017. P. 7188-7197.
8. Bosking W.H., Foster B., Sun P., Beauchamp M.S., Yoshor D. Rules Governing Perception of Multiple Phosphenes by Human Observers. *BioRxiv.* <https://doi.org/10.1101/302547>. 2018.
9. Brindley G.S. Effects of electrical stimulation of the visual cortex. *Hum. Neurobiol.* 1. 1982. P. 281-283.
10. Brindley G.S., Lewin W.S. The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex. *J. Physiol.* 196, 1968. P. 479-493.
11. Chen R., Romero G., Christiansen M.G., Mohr A., Anikeeva P. Wireless magnetothermal deep brain stimulation. *Science* 347, 2015. P. 1477-1480.
12. Christie B.P., Ashmont K.R., House P.A., Greger B. Approaches to a cortical vision prosthesis: implications of electrode size and placement. *J. Neural Eng.* 13, 025003. 2016.

13. Cox R.W. AFNI: software for analysis and visualization of functional magnetic resonance neuroimages. *Comput. Biomed. Res.* 29, 1996. P. 162-173.
14. Dale A.M., Fischl B., Sereno M.I. Cortical surface-based analysis. I. Segmentation and surface reconstruction. *Neuroimage* 9, 1999. P. 179-194.
15. Davis T.S., Parker R.A., House P.A., Bagley E., Wendelken S., Normann R.A., Greger B. Spatial and temporal characteristics of V1 microstimulation during chronic implantation of a microelectrode array in a behaving macaque. *J. Neural Eng.* 9, 065003. 2012.
16. Deisseroth K. Optogenetics: 10 years of microbial opsins in neuroscience. *Nat. Neurosci.* 18, 2015. P. 1213-1225.
17. De Yoe E.A., Lewine J., Doty R.W. Optimal stimuli for detection of intracortical currents applied to striate cortex of awake macaque monkeys. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE)*, 1989.
18. Dobbelle W.H., Mladejovsky M.G., Evans J.R., Roberts T.S., Girvin J.P. «Braille» reading by a blind volunteer by visual cortex stimulation. *Nature* 259, 1976. P. 111-112.
19. Dumm G., Fallon J.B., Williams C.E., Shivdasani M.N. Virtual electrodes by current steering in retinal prostheses. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 55, 2014. P. 8077-8085.
20. Firszt J.B., Koch D.B., Downing M., Litvak L. Current steering creates additional pitch percepts in adult cochlear implant recipients. *Otol. Neurotol.* 28, 2007. P. 629-636.
21. Fischl B., Sereno M.I., Dale A.M. Cortical surface-based analysis. II: Inflation, flattening, and a surface-based coordinate system. *Neuroimage* 9, 1999. P. 195-207.
22. Gross R.E., Mc Dougal M.E. Technological advances in the surgical treatment of movement disorders. *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.* 13, 2013. P. 371.

23. Kalkman R.K., Briaire J.J., Frijns J.H. Stimulation strategies and electrode design in computational models of the electrically stimulated cochlea: An overview of existing literature. *Network* 27, 2016. P. 107-134.

24. Khodagholy D., Gelineas J.N., Thesen T., Doyle W., Devinsky O., Malliaras G.G., Buzsáki G. NeuroGrid: recording action potentials from the surface of the brain. *Nat. Neurosci.* 18, 2015. P. 310-315.

25. Klauke S., Goertz M., Rein S., Hoehl D., Thomas U., Eckhorn R., Bremmer F., Wachtler T. Stimulation with a wireless intraocular epiretinal implant elicits visual percepts in blind humans. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 52, 2011. P. 449-455.

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 4-го курса лечебного факультета Воронежского государственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко

УДК 54.00

**ИСТОРИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ХИМИИ
В ВИСИ-ВГАСА-ВГАСУ-ВГТУ**

О.Б. Рудаков*

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

**Адрес для переписки: Рудаков Олег Борисович E-mail: robi57@mail.ru*

В статье в преддверии 90-летия Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, вошедшего в состав Воронежского государственного технического университета, рассмотрены этапы становления кафедры, обеспечивающей преподавание химических дисциплин, рассмотрены традиции кафедры, научный потенциал преподавателей, организация на кафедре учебного процесса и его методическое обеспечение.

Ключевые слова: химия, химические дисциплины, преподаватель высшего учебного заведения

**HISTORY OF TEACHING CHEMISTRY
IN VISI-VGASA-VGASU-VGTU**

O.B. Rudakov*

*Voronezh state technical University,
Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya str., 84*

**Address for correspondence: Rudakov Oleg B., E-mail: robi57@mail.ru*

The article on the eve of the 90th anniversary of Voronezh state University of architecture and construction, included in the Voronezh state technical University, discussed the stages of development of the faculty providing the teaching of chemical disciplines, the article considers the traditions of the Department, the scientific potential of teachers, the organization of the Department of educational process and its methodological support.

Keywords: chemistry, chemical disciplines, higher education teacher

В июне 1930 года было создано Высшее техническое заведение (в разные годы меняющее название: Строительный ВТУЗ – Воронежский учебно-строительный комбинат – Институт гражданского воздушного флота – Воронежский инженерно-строительный институт – Воронежский авиационный институт – Воронежский инженерно-строительный институт), как опорный технический ВУЗ для подготовки инженерных кадров не только для региона, но и страны в целом. Существование Воронежского авиационного института послужило отправной точкой для организации в 1956 году Воронежского политехнического института, а спустя 60 лет после этого произошло историческое объединение двух учебных заведений ВГАСУ и ВГТУ. В марте 2016 года начался новый этап истории учебного заведения, ВГАСУ и ВГТУ были реорганизованы в Воронежский опорный технический университет, который в настоящее время имеет название ВГТУ, однако в настоящее время идет активная дискуссия о новом названии Университета.

История создания и развития кафедры химии ВГАСУ, так или иначе, отражена в нескольких публикациях, прежде всего в персоналиях ученых и педагогов, работавших и продолжающих трудиться в Университете [1-7]. Химическая подготовка студентов в Воронежском инженерно-строительном институте (ВИСИ) ведётся с 1930 года, т. е. с года его основания. Вначале химические дисциплины преподавали сотрудники Воронежского государственного университета (ВГУ): В.В. Карпинский, Р.Э. Нейман, Н.В. Култашев. ВГУ оказывал не только методическую, но и материальную поддержку, предоставляя лабораторное оборудование, химические реактивы и химическую посуду.

Годом основания кафедры химии, как самостоятельного подразделения вуза, принято считать 1944 год. Организационная работа по созданию необходимых для учебного процесса условий была возложена на первого заведующего кафедрой кандидата химических наук, доцента Митрофана Михайловича Быкова, приглашённого ректором ВИСИ В.Н. Казаковым и проректором С.Е. Дольским из Краснодарского химико-технологического института, где М.М. Быков заведовал кафедрой неорганической и аналитической химии (рис. 1).



Рис. 1. Быков М.М.

В невероятно трудных условиях еще военных и послевоенных лет формировалась материальная база кафедры. Через Министерство строительных материалов СССР были получены два ящика химической посуды, из г. Самарканда в товарном вагоне М.М. Быков лично привёз 4 аналитических весов и т. д. В 1945-46 учебном году Кафедра химии имела 3 лабораторных аудитории и 1 лекционную (теперь аудитория 2201), на кафедре работали М.М. Быков, В.И. Уточкин, М.И. Проскурин. В 1946 году были приняты на работу ассистенты Л.М. Кудинова, Р.М. Бабич и два лаборанта-препаратора. В 1949 году органическую химию стала читать доцент Тарасова Н.М.

В своих мемуарах М.М. Быков отмечал, что «порыв к знанию, желание учиться сразу же после освобождения г. Воронежа был настолько велик, что ни ледяной холод в аудиториях, ни отсутствие тетрадей (писали на газетной бумаге) никого не останавливали, никто не опаздывал на занятия и не пропускал их. Коллоквиумы, зачёты, экзамены сдавали, как правило, нормально, требования были достаточно серьёзными, никаких скидок студентам не было – шёл нормальный учебный процесс, если не считать трудности его проведения» [1].

Был организован химический кружок, в котором студенты занимались научно-исследовательской работой с постановкой экспериментов. Весной 1946 года на кафедре химии был организован и проведён первый научный семинар – прообраз ежегодных научно-технических конференций преподавателей и сотрудников. С докладами выступили не только преподаватели, но и студенты. Слушателями семинара были многие преподаватели из других кафедр института.

В 1953 году на должность заведующего кафедрой химии была избрана кандидат химических наук, доцент Ольга Владимировна Нейман (рис. 2.), ранее работавшая на кафедре физической и коллоидной химии ВГУ.



Рис. 2. Нейман О.В.

Увеличение приёма студентов в ВИСИ по новым инженерным специальностям требовало организации на кафедре полноценных химических лабораторий и подбора соответствующих преподавательских кадров. Это касалось в первую очередь спецкурсов для студентов специальности ПСК: неорганической, органической, аналитической, физической и коллоидной химии. Благодаря огромному организаторскому таланту О.В. Нейман, её неистощимой энергии, кафедра химии стала оснащаться типовым лабораторным оборудованием, химическими приборами. Были внедрены в спецкурсы методические разработки, необходимые инженерам-технологам, налажена тесная связь с выпускающими кафедрами. Будучи опытным методистом, О.В. Нейман возглавляет работу по изданию методических пособий и указаний к лабораторным работам.

Была начата подготовка преподавателей через целевую аспирантуру: Г.В. Либерман, Л.М. Кудинова, Г.Г. Кривнева успешно закончили аспирантуру. Под руководством О.В. Нейман окончила аспирантуру и защитила диссертацию по строительному профилю М.И. Беликова.

В первую очередь на кафедре химии изучали химические проблемы вязущих веществ, что нашло отражение в докладах сотрудников кафедры на Всесоюзных конференциях по коллоидной химии (Воронеж, 1968 год) и физико-химической механике дисперсных систем (Минск, 1970 год, Ленинград, 1972 год).

В 1969 году кафедра химии была переведена во вновь построенный корпус 2, где имела специализированные лаборатории общей и неорганической, аналитической, органической и физической химии, весовую комнату, склад для реактивов, преподавательскую, лаборантскую, препаратную комнаты. Кафедра могла полностью обеспечить учебный процесс по химико-технологической специальности «Химическая технология керамики и огнеупоров», которая была высоко востребована у обучающихся и производственников.

Ольга Владимировна Нейман была очень популярна в Институте. Её популярность была основана, прежде всего, на преданности делу, высокой общественной активности, трудоспособности, принципиальности и бескомпромис-

ности, а также на некоторой неординарности. В то время, например, она увлекалась самодеятельностью. Она ездила на работу на велосипеде. Кстати, автор этих строк делает то же самое. Это типичное транспортное средство для студентов и преподавателей в европейских университетах. Там не только размечены велосипедные дорожки, но и оборудованы стоянки для велосипедов. Пора эту спортивную культуру внедрять в г. Воронеже и в нашем Университете, в частности.

С 1969 по 1974 г.г. кафедрой химии заведовала Г.В. Либерман (рис. 3). Она блестяще окончила химический факультет ВГУ, работала на Урале, защитив под руководством В.А. Киреева в МХТИ кандидатскую диссертацию и получив звание доцента, она пришла работать на кафедру химии ВИСИ. В эти годы на кафедре работали доценты О.В. Нейман, Н.М. Тарасова, ст. преподаватель Л.М. Кудинова и ассистенты Р.М. Бабич, М.И. Беликова, Н.Н. Буренина, Е.А. Левина, Ж.А. Нечпаева, А.В. Лапшова, Т.Г. Целиковская. После ухода на пенсию старейших опытных преподавателей по конкурсу были выбраны кандидаты химических наук В.В. Шаталова, Л.Г. Барсукова, О.Р. Сергуткина, В.В. Заречанская, Г.Г. Кривнева, М.М. Аболь и В. И. Галактионова.



Рис. 3. Либерман Г.В.

Из инженерного и лаборантского состава кафедры следует особо отметить заведующую лабораторией кафедры Л.И. Безрядину и старшего лаборанта Р.Г. Черепяхину [5], которые обеспечивали учебный процесс всем необходимым: оборудованием, реактивами, химической посудой, руководили учебно-вспомогательным персоналом, среди которых были замечательные работники: И.А. Скобочкин, Н.М. Дятчина, Л.И. Казакова.

В годы заведования кафедрой Г.В. Либерман значительно повысился уровень преподавания общей и неорганической химии. Сотрудники кафедры участвовали в работе симпозиумов преподавателей химии в нехимических вузах (Москва, Казань, Уфа), перенимали передовой опыт и внедряли его в учебный процесс. Г.В. Либерман в сотрудничестве с физиками-теоретиками разработала новый курс «Строение вещества» и руководила работой научного семинара кафедры по данной проблематике. Были издан целый ряд учебных пособий, по которым не один год учились молодые преподаватели и студенты.

С 1974 по 1990 г.г. кафедру возглавляет доктор химических наук, профессор Алевтина Прокопьевна Перова (рис. 4).



Рис. 4. Перова А.П.

Кафедра обеспечивается техническими средствами обучения: диапроекторы различных марок для демонстрации слайдов на лекциях и лабораторных занятиях, в лекционной аудитории 3222 устанавливается электрифицированная периодическая система, оборудуется лаборатория для программированного контроля знаний студентов с 15-ю машинами КИСИ. Издаются методические указания к программированному контролю по общей химии и спецкурсам, создаются учебно-методические комплексы, готовятся тексты лекций. Научно-исследовательская работа преподавателей кафедры химии проводится согласно договора о научно-техническом содружестве между ВИСИ, институтом общей и неорганической химии АН СССР и войсковой частью 44526 по изысканию антигололёдных реагентов для размораживания и предотвращения смерзаемости грунтов и карьерных заполнителей цементобетона [1].

Большое внимание уделяется воспитательной работе среди студентов, направленной на формирование интереса к будущей профессии, развитию общественной активности, развитию эстетических представлений. На кафедре составляется план мировоззренческой подготовки по всем читаемым курсам. Преподаватели кафедр, как правило, на общественных началах являются кураторами студенческих групп. Они руководят проведением политинформаций, принимают участие в комсомольских собраниях, организуют участие студентов в кружках СНО, субботниках, дежурствах ДНД, демонстрациях, сельхозработах, посещают и ведут работу в студенческих общежитиях. При кафедре работает школа молодого лектора. Алевтина Прокопьевна, сама участница Великой Отечественной войны, очень внимательно относилась к студентам, прошедшим службу в армии и пришедших на учебу из так называемого рабфака.

С 1990 по 2004 г.г. кафедрой руководит кандидат химических наук, доцент Октябрина Романовна Сергуткина [4], подготовившая и защитившая кандидатскую диссертацию в Воронежском технологическом институте (рис. 5).

В этот период много внимания уделяется методической работе: переиздаются и издаются новые учебные пособия и методические указания к выполнению лабораторных и исследовательских работ, решению контрольных зада-

ний для студентов очной и заочной формы обучения, разрабатываются руководства по проведению лабораторных работ для преподавателей и подготовке работ для лаборантов. В учебный процесс внедряется рейтинговая система оценки и контроля знаний студентов. Ежегодно преподаватели кафедры участвуют в конференции вуза по учебно-методическим вопросам.



Рис. 5. Сергуткина О.Р.

Тематика научно-исследовательской работы кафедры находится в тесной связи с профилем вуза, ряд исследований, проводимых М.И. Беликовой под руководством проф. Е.М. Чернышова [1,7], нашли широкое применение в строительной практике. Совместно с кафедрами строительного-технологического факультета и проблемной лабораторией силикатных и автоклавных материалов при самом активном участии академика РААСН Е.М. Чернышева ведутся исследования по комплексной переработке природного и техногенного сырья в целях использования его в технологиях производства строительных материалов. В рамках данной проблемы после окончания аспирантуры О.Б. Кукина успешно защищает диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук.



Рис. 6. Кафедра химии в 2009 г. Первый ряд: Глазков С.С., Слепцова О.В., Кривнева Г.В., Барсукова Л.Г., Рудаков О.Б., Славинская Г.В. Второй ряд: Дубова И.В., Хорохордина Е.А. Третий ряд: Артамонова О.В., Сергуткина О.Р., Куренкова О.В., Пополитова Е.А., Кукина О.Б., Черепихина Р.Г.

Наступает очередное время смены поколения преподавателей на кафедре химии. Рядом с преподавателями старшего возраста стали работать на кафедре молодые, способные кандидаты наук, пришедшие из ВГУ: О.В. Слепцова, Г.Ю. Вострикова, О.В. Артамонова. С 2004 года и по настоящее время кафедрой химии (после объединения ВГАСУ и ВГТУ – кафедра химии и химической технологии) заведует доктор химических наук, профессор Олег Борисович Рудаков (рис. 7). С его приходом на кафедре начала работать докторантура и заметно оживилась работа аспирантуры: 6 докторантов – Артамонова О.В., Брындина Л.В., Глазков С.С., Подолина Е.А., Никитина С.Ю. и Калач Е.А., прошли подготовку в докторантуре кафедры и 5 из них успешно защитили дис-

сертации докторов наук. Несколько аспирантов – Хорохордина Е.А., Григорьев А.М., Байдичева О.В., Фан Винь Тхинь, Куренкова О.В., Чан Хай Данг, Кудухова И.Г. и Черепяхин А.М., защитили диссертации кандидатов наук. К этому времени Григорьев А.М. успешно защитил в МГУ докторскую диссертацию.



Рис. 7. Рудаков О.Б.

Преподаватели и научные сотрудники кафедры активно участвуют в работе Российских и международных конференций, публикуются в престижных журналах и академических изданиях. Например, проф. Рудаков О.Б. подготовил 197 статей по органической химии в таком фундаментальном академическом издании, как Большая Российская Энциклопедия. Кафедра химии обладает высокой публикационной активностью, ее сотрудники ежегодно публикуют от 50 до 100 публикаций в год, включая несколько статей, индексируемых в международных библиографических базах Web of Science и Scopus, участвуют в выполнении научных исследований по госзаданию, грантам, хозяйственным договорам.

В 2017 г. Кафедра химии была переименована в Кафедру химии и химической технологии в связи с тем, что при объединении вузов возникло 2 кафедры с одинаковым химическим профилем, однако через короткое время было принято решение объединить эти кафедры.

У кафедры общей химии «политеха» есть своя биография, о ней поделился в своих воспоминаниях профессор Шалимов Ю.Н. [8]. Одним из первых заведующих этой кафедры был Антипов В.Е., наиболее яркий след в истории кафедры оставила профессор, заведующая кафедрой Фаличева А.И., после ее кончины кафедру на несколько лет упразднили, передав химические дисциплины на кафедру промтеплоэнергетики. Только в 2010 году кафедру общей химии возродили как самостоятельное подразделение. С 2010 г. и до объединения с кафедрой химии и химической технологии, ее возглавлял проф. Небольсин В.А., одновременно выполняя обязанности декана Факультета радиотехники и электроники. Объединение кафедры с точки зрения ее научного и педагогического потенциала придало ей новый стимул, расширило сферу преподавания химических дисциплин при подготовке учащихся среднего профессионального образования, бакалавриата, магистратуры и аспирантуры.

Список литературы

1. Сергуткина О.Р., Беликова М.И., Байдичева О.В. Кафедра химии ВГАСУ – коллектив преподавателей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения. 2008. № 1. С. 155-159.
2. Чернышов Е.М., Артамонова О.В. Успех – это, прежде всего, результат колоссального труда, и лишь потом – врожденного таланта // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 3 (26). С. 4-13.
3. Сергуткина О.Р., Артамонова О.В. О роли химии в подготовке инженеров-строителей // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 3 (26). С. 14-22.
4. Рудаков О.Б., Кукина О.Б., Колосов А.И., Небольсин В.А. К юбилею Черепahiной Раисы Георгиевны // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 3 (26). С. 153-155.
5. Давыдова Е.Г., Власов В.В., Усачев С.М., Усачев А.М. Химия, технология и материаловедение. Особенности обучения в Строительно-

технологическом институте ВГТУ // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 2 (13). С. 109-115.

6. Селеменев В.Ф., Калач А.В., Перцев В.Т. Рудаков Олег Борисович (К 60-летию) // Химия, физика и механика материалов. 2017. № 2 (15). С. 121-124

7. Чернышов Е.М. Химия, физика, механика в разработке проблем строительного материаловедения и технологий (ретроспекция исследований научной школы кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов к 85-летию Воронежского ГАСУ) // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения и высокие технологии. 2015. №2(11). С. 3-12.

8. Шалимов Ю.Н. Взгляд на историю развития кафедры общей химии Воронежского политехнического института // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 4 (27). С. 124-133.

References

1. Sergutkina O.R., Belikova M.I., Bajdicheva O.V. Kafedra himii VGASU - kollektiv prepodavatelej // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Fiziko-himicheskie problemy stroitel'nogo materialovedenija. 2008. № 1. P. 155-159.

2. Chernyshov E.M., Artamonova O.V. Uspeh – jeto, prezhde vsego, rezul'tat kolossal'nogo truda, i lish' potom - vrozhdennogo talanta // Himija, fizika i mehanika materialov. 2020. № 3 (26). P. 4-13.

3. Sergutkina O.R., Artamonova O.V. O roli himii v podgotovke inzhenerov-stroitelej // Himija, fizika i mehanika materialov. 2020. № 3 (26). P. 14-22.

4. Rudakov O.B., Kukina O.B., Kolosov A.I., Nebol'sin V.A. K jubileju Cherepahinoj Raisy Georgievny // Himija, fizika i mehanika materialov. 2020. № 3 (26). P. 153-155.

5. Davydova E.G., Vlasov V.V., Usachev S.M., Usachev A.M. Himija, tehnologija i materia-lovedenie. Osobennosti obuchenija v Stroitel'no-tehnologicheskom institute VGTU // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Fiziko-himicheskie problemy i vysokie tehnologii stroitel'nogo materialovedenija. 2016. № 2 (13). P. 109-115.

6. Selemenev V.F., Kalach A.V., Percev V.T. Rudakov Oleg Borisovich (K 60-letiju)// Himija, fizika i mehanika materialov. 2017. № 2 (15). P. 121-124.

7. Chernyshov E.M. Himija, fizika, mehanika v razrabotke problem stroitel'nogo materialovedenija i tehnologij (retrospekcija issledovanij nauchnoj shkoly kafedry tehnologii vjazhushhih veshhestv i betonov k 85-letiju Voronezhskogo GASU) // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Fiziko-himicheskie problemy stroitel'nogo materialovedenija i vysokie tehnologii. 2015. №2 (11). P. 3-12.

8. Shalimov Ju.N. Vzgljad na Istoriju razvitija kafedry obshej himii Voronezhskogo politehnicheskogo instituta // Himija, fizika i mehanika materialov. 2020. № 4 (27). P. 124-133

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

**ВЗГЛЯД НА ИСТОРИЮ РАЗВИТИЯ КАФЕДРЫ ОБЩЕЙ ХИМИИ
ВОРОНЕЖСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**

*Ю.Н. Шалимов**

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

**Адрес для переписки: Шалимов Юрий Николаевич, E-mail: shalimov yn@mail.ru*

В статье приведена история становления и развития кафедры общей химии ВГТУ, рассмотрен вклад проф. Фаличевой А.И. в научные разработки кафедры, обозначены проблемы и перспективы физико-химических исследований в технической области.

Ключевые слова: персоналии, преподаватель высшего образования, химия

**HISTORY OF THE DEPARTMENT OF GENERAL CHEMISTRY
OF THE VORONEZH POLYTECHNIC INSTITUTE**

*Yu.N. Shalimov**

*Voronezh state technical University,
Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84*

**Address for correspondence: Yuri Shalimov, E-mail: shalimov yn@mail.ru*

The article presents the history of the formation and development of the Department of General chemistry of VSTU, the contribution of Prof. Falicheva A. I. in scientific developments of the Department, the problems and prospects of physical and chemical research in the technical field are outlined.

Keywords: personalities, higher education teacher, chemistry

Статья подготовлена по воспоминаниям выпускника 1964 года кафедры «Радиотехника» (заведующий Зиновий Моисеевич Каневский) Шалимовым Ю.Н.

В течение всей моей жизни, а трудовой стаж ее официально исчисляется с 1951 года, у меня ни на секунду не возникало даже сомнения в том, что химия нужна радиофизику. Ответ только утвердительный и даже больше, чем представителям других специальностей. И это сказано не ради красного слова.

Первое мое знакомство с кафедрой общей химии прежнего образца произошло на 1 курсе заочного факультета ВПИ, где обучался по специальности «Электрические машины и аппараты», так как работал на Воронежской ТЭЦ-2. В то время еще требовали соответствие рабочей профессии избранной для обучения специальности. Ну и поскольку и моя специальность и специальность по техникуму совпадали, то вопросов у приемной комиссии ко мне не возникло. Кафедру общей химии в то время возглавлял доцент, канд. хим. наук Валентин Емельянович Антипов. Лекции нам читала доцент Нина Николаевна Хитрова.

Практические и лабораторные занятия у энергетиков вела ассистент Надежда Глебовна Мелешко. На первом же лабораторном занятии, я был единственным, который на все поверочные вопросы дал отрицательные ответы и лишь на последний ответил утвердительно. А его формулировка была проста: «Считаете ли Вы необходимым изучение курса общей химии для вашей специальности?». Я ответил утвердительно. И действительно, на приобретение знаний по химии в моем суммарном времени уходило более 2/3 объема. Только теперь я осознал, сколько сил и нервов потратила на меня терпеливая и бескорыстная Надежда Глебовна. Вечная и добрая память таким терпеливым и мудрым педагогам. И когда на выпускном экзамене по химии Н.Н. Хитрова поставила в мою «зачетку» «четверку», сказав при этом, что «для заочников это высший пилотаж» (в смысле – достижение), то неугомонная Надежда Глебовна буквально заставила ее дать мне любой билет, на который я должен ответить без подготовки. Все-таки я думаю, что Н.Г. Мелешко воспользовалась статусом

супруги ректора университета ВГУ. И, конечно, я ответил и получил «пятерку», но вместе с ней и кличку «Химик».

В то время система получения высшего образования в ряде профильных ВУЗов не предполагала проведение научно-исследовательских работ, и от средней школы их отличал только возраст обучаемых и обучающихся. Но как все изменилось, когда ВПИ был преобразован в дневной институт и его ректором стал в то время полный сил, доктор физ.-мат. наук профессор Валентин Семенович Постников. Обновился профессорско-преподавательский состав. Пришли совсем молодые доктора наук: Гарри Данилович Дель со своими аспирантами, Роберт Васильевич Шнель, зав. кафедрой физики Шермергор. На кафедру химии из Новомосковска пригласили Анфису Ивановну Фаличеву, которой дали возможность набрать аспирантов из числа выпускников ВПИ. Нет смысла останавливаться на возникающих коллизиях между старыми и новыми кадрами. Но мнение Анфисы Ивановны Фаличевой было таким, что преподаватель ВУЗа без выполнения научных исследований не перспективен, и это не всем пришлось по вкусу.

В аспирантуру были зачислены Шалимов Ю.Н., Бурдыкина Р.И., Гранкин Э.А., Гуляев А.А., уже имевшие опыт научно-исследовательской работы на предприятиях, связанных с технологиями электрохимических производств в различных отраслях народного хозяйства СССР (Воронеж, Шебекино, Белгородская область).

Практически все принятые после окончания ВПИ по распределению в лабораторию ультразвуки впоследствии и составили основу научно-педагогических кадров нашего института. И даже начальное финансирование хоздоговорных работ осуществлялось по тематике дипломных проектов этих сотрудников («ультразвуковой расходомер растворов жирных кислот», Шебекинский химкомбинат, Белгородская область; «Определение пористости материалов на основе глиноземных огнеупоров», г. Семилуки). И, самое главное, аспиранты и вспомогательный персонал работников по хоздоговорам активно включился в научно-исследовательскую работу по изучаемым процессам. Ос-

новые направления базировались на изучении механизмов хромирования и структурных изменений хромовых покрытий, анодной обработки титана, алюминия и их сплавов, по заказу Воронежского авиазавода, оборонных предприятий г. Пензы и г. Горького.

Большое число научных контактов проф. Фаличевой позволило наладить постоянно действующие семинары с Москвой, Ленинградом, Харьковом, Свердловском, Новочеркасском, Черновцами, Ригой.

Для материальной базы кафедра приобрела электронный микроскоп УЭМВ-100, ультразвуковые генераторы, полный набор станочного оборудования. Но самое главное в экспериментальных работах кафедры и достойное место имел метод внутреннего трения, и это не просто определенная дань методу как наиболее популярному, поскольку в то время редкий журнал не публиковал работ по этому вопросу.

Но метод не может быть модным, и мы видели в нем возможности найти ответ на вопросы, которые невозможно решить, используя другие методики. И действительно упорные усилия аспиранта Э.А. Гранкина попали в точку, которая явилась решением проблемы по определению прочностных свойств металлов и сплавов на основе хрома. И только на его повторной защите работы в президиуме ВАКа член-корр. Академии наук СССР Ю.М. Полукаров буквально так отозвался об оппоненте, продержавшем почти 2 года работу без рецензии буквально следующее: «держат такую работу в столе – просто преступление». А ведь защита проходила в нашем совете: по химическому сопротивлению металлов и защите от коррозии.

Такая же участь была уготована и мне – Ю.Н. Шалимову, но обошлось без трагических моментов. Михаил Александрович Шлутер (мой внешний оппонент), знавший меня по диспуту с ним в Тбилиси, в течение 1 месяца дал положительное заключение.

У меня перед глазами всегда лежит авторский реферат докторской диссертации Анфисы Ивановны Фаличевой, который она пописала «моему первому аспиранту на Воронежской земле Юрию Шалимову с пожеланием написать

то же самое своему первому аспиранту, но в более короткие сроки». А ей был в то время 51 год. Я защитил свою докторскую диссертацию на 20 лет позже, но не жалею об этом.

Ее последнее предсмертное желание я выполнил, – она просила вернуть кафедре ее прежнее название. И ректор ВГТУ В.Р. Петренко после моей защиты вернул это название «Кафедра общей химии». Мое мнение об Анфисе Ивановне однозначно определенное – этот человек умел добиваться цели, а это главная черта научного руководителя. Ведь и наставники, и ученики – люди абсолютно разные. И найти им компромисс между собой, думаю, не всегда просто.

Вместе с тем ей был свойственен характер человека-организатора, ведь во время войны она была начальником цеха гальванического хромирования. Проработав с Анфисой Ивановной практически 33 года, я вспоминаю обо всех наших разногласиях, иногда доходивших до абсурда. Однако, после которых она, проходя по коридору, спрашивала, остыл я или нет, и получив подтверждающий кивок, как ни в чем, ни бывало, говорила: «Зайди в 407 (кабинет зав. кафедры), – есть задача, которую необходимо решить».

При обсуждении результатов Анфиса Ивановна говорила, что, прежде всего, необходимо остановиться на особенностях химического состава электролитов, хотя не всегда это было основной причиной изменений физико-механических характеристик образца.

Следует отметить особую тщательность в оформлении результатов экспериментов. Пожалуй, только многочисленные дубли эксперимента и были основной причиной того, что отправленные в издательство материалы принимались практически без исправлений. Сейчас бы это назвали модным термином «перфекционизм».

Так при решении вопросов, связанных с изменением представлений о характере взаимосвязи свойств образца и технологическими режимами его получения возникали ситуации, как бы противоречащие традиционным представлениям. Увеличение числа центров нуклеации в условиях импульсного электролиза как раз и свидетельствует о том, что образец формируется с меньшим раз-

мером зерна (мелкокристаллическое покрытие), но межзеренная граница при этом возрастает, а именно она и увеличивает дефектность структуры. Другими словами, дефекты выполняют здесь роль активных мест включения водорода, то есть играют положительную роль для накопления энергии. И нет в этом никакого парадокса. Срабатывает принцип академика И.В. Курчатова о диалектике эксперимента.

Непозволительно выбрасывать из нашей памяти как радостные, так и печальные события. Да, у судьбы нет сослагательного наклонения, но, наверное, не так печален был бы уход из нашей жизни Анфисы Ивановны, если бы не высочайшая организационная способность Анфисы Ивановны в создании научного направления по внедрению процессов хромирования из низковалентных электролитов. К сожалению, историю нашей многострадальной России пытаются переписать даже на уровне отдельных организаций, институтов. Решение одного из ректоров – «псевдопоследователей» В.С. Постникова, выставить на продажу учебный корпус № 2 по ул. Плехановской, 11, где помещалась кафедра общей химии, фактически привело к потере учебно-лабораторной и исследовательской базы. Не хочется даже называть имя и фамилию этого руководителя. До сих пор в нашем ВУЗе остались его приверженцы. Но для А.И. Фаличевой эта история сыграла роковую роль, дополнительным ударом для нее был приказ о ликвидации кафедры как отдельного структурного подразделения. Кафедра общей химии по приказу ректора вошла в полном составе в кафедру промтеплоэнергетики. Её заведующий, Владислав Васильевич Фалеев, предложил мне возглавить, как нас тогда обзывали «сектор химии», но при этом поставил условия, проводить на пенсию лекторов к.х.н. Бурдыкину Р.И. и к.х.н. Горшуну В.П. Я ответил отказом, и этот сектор возглавил доцент кафедры ПТЭ Владимир Дубанин. Анфисе Ивановне в НКТБ «Феррит» нам удалось оборудовать отдельный кабинет. Но для неё это было слабым утешением. Последний раз мы возвращались с 9-го километра из 4-го корпуса в начале июля 2000 года, прямо перед началом моего очередного отпуска. Я не мог даже предположить, что это было фактически прощальная беседа. В августе состоялись её похоро-

ны. Собрались только самые близкие люди и аспиранты, из доцентов других вузов была только зав. кафедрой общего химии Бельчинская Л.И. От нашего ВУЗа прощальные слова сказал председатель профкома Сатин В.А.

После кончины Анфисы Ивановны я понял, что работать дальше на кафедре В.В. Фалеева нам будет сложно. Причина была проста, он считал обоснованными решения директора НКТБ «Феррит». Желая избавиться от бесценной для эксперимента установки «Оратория» руководство «Феррита» предложило нам передать ее на баланс кафедры ПТЭ. Мне удалось отсрочить демонтаж. И выход, как мне показалось, был найден. В это время в институте была создана кафедра МЧС и её возглавил Виталий Иванович Федянин, «молодой» доктор технических наук, член Ученого совета ВПИ. Он согласился принять преподавателей-химиков в состав своей кафедры во втором корпусе, который по счастью продать не разрешили, и мы вернулись на свое прежнее место. Было оговорено с ним, что демонтированная установка «Оратория» будет привезена и размещена в подвале корпуса на Плехановской, 11. В то время НКТБ «Феррит» возглавлял Ю.В. Литвинов, мой первый аспирант, который в 2006 году успешно защитил кандидатскую диссертацию в Ивановском химико-технологическом университете. Не могу вспомнить, но скорее всего я не подписывал ему реферат с дарственной подписью, потому, что в то время наш ректор строго следил за тем, чтобы в настоящую науку шли только ему лично преданные люди, как, например, В.И. Федянин. Судьба «Оратории» оказалось в соответствии к крылатым выражением незабвенного В.В. Черномырдина: «хотели как лучше, а получилось как всегда». Оборудование ушло на металлолом. К сожалению, я был вынужден уйти из кафедры МЧС и вернулся «на 9 километр», на кафедру В.П. Шелякина, где мне предложили курс лекций по водородной и альтернативной энергетике. Мне удалось на остатках оборудования с помощью НКТБ «Феррит» организовать и начать работать во вновь созданном 15 отделе этого предприятия, который я возглавил. Фактически это было новое направление, и на основе полученных нашим отделом результатов было предложено заключить совместной договор по разработке системы тепловой защиты корпусов ле-

тательных аппаратов определенного назначения. Подготовленный мной проект технического задания прошёл экспертизу у соответствующей комиссии, и мы вместе с новым руководством были вызваны в МО РФ. Защита проекта прошла успешно, но дальнейшая судьба проекта осталась неясной, его финансирование было прекращено, коллектив, работавший над ним, был уволен из состава НКТБ «Феррит», было списано на металлолом как «устаревшее» уникальное оборудование. Об этом больно вспоминать. Но так заканчивать историю кафедры не хочется.

Отмечу отличную работу аспирантки Ирины Полуниной, на защиту которой, в качестве оппонента приезжала из далеких Черновцов Александра Ивановна Лопушанская, без всякого преувеличения главный теоретик по электрохимическим процессам. Как ученый, педагог и человек – эталон для научного работника. Она поблагодарила Анфису Ивановну за представленную И. Полуниной работу.

Вспоминается демонстрационный вылет нашего ТУ-144 с аэродрома авиазавода. На смотровую площадку авиазавода были приглашены всего 5 представителей ВПИ: ректор ВПИ Постников В.С., зав. кафедрой общей химии Фаличева А.И., Алтухов В.К., Гранкин Э.А., и автор этих строк, в то время доцент кафедры общей химии. В это время наша кафедра проводила по заданию НИАТ и ВИАМ работу по анодной обработке титана и титановых сплавов. И Валентин Семёнович вдруг сказал фразу, от которой у меня возникает теплое чувство причастия к важному делу: «Ведь в этой поднявшейся в небо красоте есть частица и нашей с вами работы».

Но это все в прошлом, а что же впереди. Есть шансы развернуть выполнение пилотного проекта, в котором предполагается задействовать практическое использование всех высококвалифицированных кадров из ВУЗов города, и даже региона. Фактически, это должно быть межвузовское научно-производственное объединение, способное решать не только научные, но и производственные задачи нашего региона, а возможно и всей России. Для этого необходимо создать три лаборатории с различными направлениями их деятель-

ности: – это «АЭЛИТА», в задачу которой входит создание синтезированного топлива для авиации на основе алюмогидридов; «ИГЛА» – исследование георесурса для авиации; «Факториал» – его задача – обеспечение пуско-наладочных работ по технологиям, разработанным первыми двумя лабораториями. «Аэли-та» – основная цель и назначение которой является разработка технологии производства синтетического авиационного топлива на основе алюмогидридов (водородная энергетика). Предварительные исследования физико-химических свойств алюминия, проведенные на кафедрах общей химии, промтеплоэнергетики, МЧС и самолетостроения показали, что использование водорода в качестве топлива имеет перспективу применения в авиации только при разработке надежной технологии его производства, хранения и использования. Опыт использования самолета-лаборатории ТУ-155 показал высокоэнергетические свойства криостатного водорода, но он стратегически проигрывает существующему традиционному керосину. Наверное, не стоит возлагать надежды на сжиженный природный газ, хотя он перспективнее традиционного керосина. И, кроме того, его запасы в недрах нашей планеты тоже не безграничны. Именно поэтому работа этой лаборатории имеет полное право на свое существование. И главное для этого есть достаточно весомые доказательства. Водородная энергетика становится трендом современного развития всей мировой энергетике, этой проблематикой занимаются крупные международные научные коллективы и бизнес.

«Исследовательская георесурсная лаборатория авиации» «ИГЛА»

Вопрос о ресурсе нашей планеты по возобновляемым источникам энергии имеет ограниченное число составляющих (гелио-, ветроэнергетика и термальные воды и т. п.).

Самый значимый по объему источник возобновляемой энергии – биомасса, которая пока используется в значительной степени не рационально. И поэтому основной задачей этой лаборатории, как следует из ее названия, и является поиск таких источников и методов получения энергии и ее аккумуляции применительно к авиации. И здесь речь идет не только о водородных тех-

нологиях, но и о возможном использовании гелиоэнергетики, и даже ядерных источников.

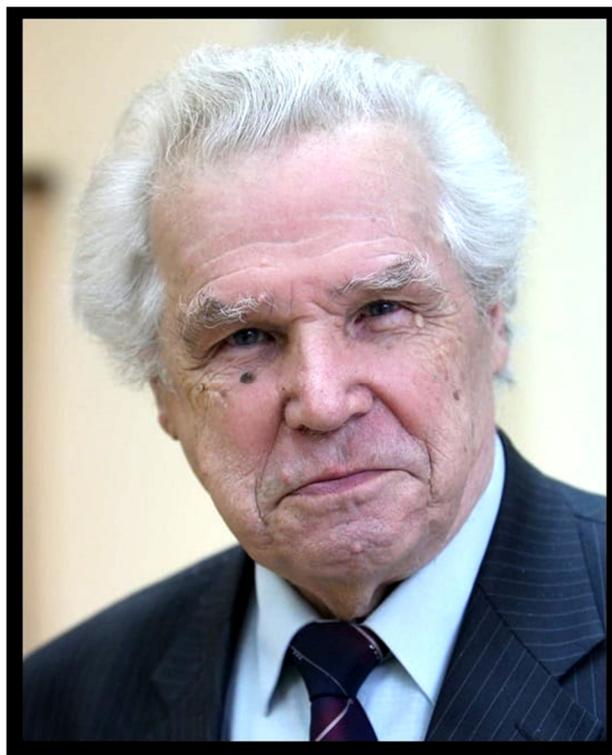
Уверенность в успешном решении этой задачи основывается на том, что функциональные свойства материалов, полученным по этим технологиям с более высокой степенью надежности осуществляются преобразование одного вида энергии в другой, например, тепловой в электрическую. Ведь в этом случае из системы исключаются механические и электромеханические преобразователи, так как они являются основной причиной отказов в работе устройства.

Наши коллеги предлагают хранить водород в баллонах из легкого материала высокой прочности при высоких давлениях. Но используются для плавной подачи водорода механические редукторы газа. Это, прежде всего высокая вероятность отказа и, кроме того, малая надежность уплотнений для водорода.

Лаборатория «Факториал»

Фактически сотрудники этой лаборатории занимаются внедрением разработанных технологий и процессов на предприятиях заказчика. Такая организация производства адаптирована мной из опыта прежней работы в Новосибирском отделении Всесоюзного института «Электропроект», в котором я работал в лаборатории пуско-наладочного типа. По выполненному нашим институтом проекту мы осуществляли наладку электрооборудования на предприятиях самого разного профиля, осуществляли его пуск и сдавали его эксплуатационникам. После этого в институте составлялся подробный отчет с указанием, сделанных в ходе наладочных работ исправлений и замечаний с целью повышения надежности работы оборудования. Все это далее передавалось в конструкторские отделы, где шла корректировка пуско-наладочных схем по нашим предложениями. Такая схема позволяла улучшать качество выполняемых проектов, так как каждый последующий содержал гораздо меньше ошибок, чем предыдущий. Считаю, что такая преемственность в организации работ необходимо сохранить.

**БАЖЕНОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ – ОСНОВАТЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ
РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ БЕТОНОВЕДЕНИЯ**



**БАЖЕНОВ Юрий Михайлович
(25.03.1930 – 13.12.2020)**

13 декабря 2020 года ушел из жизни **Юрий Михайлович БАЖЕНОВ** – академик РААСН, председатель научного совета РААСН «Нанотехнологии в строительном материаловедении», заведующий кафедрой «Технологии вяжущих веществ и бетонов» НИУ МГСУ, доктор технических наук, профессор, крупнейший советский и российский учёный в области строительного материаловедения.

В 1954 году Юрий Михайлович окончил Инженерно-строительный факультет Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева. Работал на строительстве оборонных объектов Северного флота, служил в Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева, а с 1975 года заведовал кафедрой «Технологии вяжущих веществ и бетонов» МИСИ–МГСУ.

Юрий Михайлович опубликовал свыше 260 научных трудов, получил 65 патентов на изобретения. Написанные им монографии, учебники и учебные пособия широко используются как в учебном процессе строительных вузов, так и в среде специалистов строительной индустрии. Им создана научная школа со-

временных проблем бетоноведения, которая объединяет учёных строительного профиля всех регионов России. За профессионализм и выдающиеся достижения в области науки и техники Юрий Михайлович Баженов был удостоен престижных российских и международных наград: «Знак Почёта» и «Инженерная слава», лауреат премии Совета Министров СССР и Правительства Российской Федерации. Ему присвоены почётные звания: «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Почётный строитель России», «Почётный строитель Москвы», «Почётный строитель Московской области». Юрий Михайлович был почетным членом Научно-технического общества строителей, почетным доктором Веймарской высшей школы по архитектуре и строительству (Германия), академиком РИА, почетным доктором ряда строительных вузов России, Веймарского архитектурно-строительного университета (Германия), Казахского архитектурно-строительного университета.

Главная идея, которая всегда звучала в его выступлениях и публикациях, его кредо: строительное материаловедение – это прикладная наука, научные разработки должны обязательно иметь перспективу практического применения. Докторантам он советовал иметь опыт работы на строительном производстве, обладать багажом внедренных на практике материалов и технологий.

Юрий Михайлович Баженов был выдающимся научно-педагогическим работником. Многие поколения строителей-технологов были воспитаны на созданных им учебниках. Удивляет широта и глубина познаний в области строительного материаловедения изложенных в его работах. Очень многие знания, изложенные им, актуальны сейчас и имеют большое будущее. Под руководством Юрия Михайловича воспитана плеяда талантливых учеников, которые определяют уровень материаловедческой науки в России.

В марте этого года научная общественность отмечала 90-летие Юрия Михайловича. К великому сожалению черная метка пандемии не обошла стороной этого человека, смерть оборвала его планы и намеченные проекты.

Светлая память о выдающемся ученом, замечательном человеке – Юрии Михайловиче Баженове, навсегда сохранится в нашей памяти и в истории строительной науки.

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 4 (27), 2020

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 30.12.2020.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 15,9. Уч.-изд. л. 13,9.
Тираж 500 экз. Заказ № 170
Цена свободная*

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

Отпечатано: участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14