

ISSN 2587-9006 (Print)
ISSN 2949-3722 (Online)

***ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»***

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

- ХИМИЯ
- ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРЕРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
- ЭКОЛОГИЯ
- БИОФИЗИКА
- ПЕРСОНАЛИИ
- ХРОНИКА

Выпуск № 2 (37), 2023

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

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

Главный редактор – д-р хим. наук, проф. О.Б. Рудаков

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцев

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.А. Небольсин

Ответственный секретарь – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р техн. наук, проф. Л.И. Бельчинская (г. Воронеж, ВГЛУ); д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р хим. наук, проф. А.Ю. Завражнов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. А.Н. Зяблов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН В.М. Иевлев (г. Москва, МГУ); д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИН); д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Козлов (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук Д.Н. Коротких (г. Москва, МГСУ); д-р геогр. наук, проф. С.А. Куролап (г. Воронеж, ВГУ); д-р техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ); д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, проф. С.Л. Подвальный (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова); д-р техн. наук, проф. Ю.В. Пухаренко (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ); д-р хим. наук, проф. А.М. Самойлов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. В.Н. Семенов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф. О.В. Стогней (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. П.Т. Суханов (г. Воронеж, ВГУИТ); д-р техн. наук, проф. А.А. Трещев (г. Тула, ТулГУ); д-р техн. наук, проф. О.Л. Фиговский (Израиль, Глава Департамента по науке инновационного центра «Альянс народов мира», г. Хайфа); д-р техн. наук, доц. О.Н. Филимонова (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р биол. наук, проф. Н.Н. Харченко (г. Воронеж, ВГЛУ); д-р хим. наук, проф. Н.В. Шелехова (г. Москва, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»).

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

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.: +7(473) 2369350, +7(473)2717617

E-mail: chemistry@vgasu.vrn.ru, lgkkn@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

Шабловский Я.О.

Термохимия стеклования расплавов..... 4

ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРЕРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Петров А.Л., Азнаев С.С., Хаглеев А.Н.

Способы улучшения адгезионных свойств поверхности полиэтиленовых пленок..... 23

Ерёмин А.В., Волокитина О.А., Абрамов Ф.М., Корнилов Е.В.

Использование переработанного пластика как добавки в асфальтобетонных смесях..... 36

Писарева И.А., Вострикова Г.Ю., Никулин С.С.

Изучение влияния расхода подкисляющего агента на процесс выделения
бутадиен-стирольного каучука из латекса..... 42

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Артамонова О.В., Закатов А.Б.

Микро- и нанокапсулирование активных добавок для самовосстанавливающихся
цементных композитов..... 49

Барковская С.В., Воронин Д.С., Рябов Г.Г.

Исследование минеральных новообразований шлакощелочного вяжущего
гидротермального твердения..... 60

Моргун В.Н., Моргун Л.В., Гебру Б.К.

О важности учета энергетического потенциала сырья при изготовлении пенобетонных
смесей 69

Усачев А.М., Безъязычная А.О., Ерусова Ю.О.

Определение основных свойств мастичных гидроизоляционных материалов..... 82

Усачев А.М., Сиденко А.А.

Изучение основных свойств щебня из песчаника и оценка его качества..... 89

ЭКОЛОГИЯ

Ерёмин А.В., Волокитин В.П., Букиша С.Н., Абрамов Ф.М., Корнилов Е.В.

Повышение экологического комфорта жизни в городах путем интеграции в
общественные пространства объектов велосипедной инфраструктуры..... 99

Волокитина А.В., Ерёмин А.В., Букиша С.Н., Корнилов Е.В., Абрамов Ф.М.

Использование беспроводной зарядки для электромобилей..... 106

Волокитин В.П., Ерёмин А.В., Букиша С.Н., Абрамов Ф.М., Корнилов Е.В.

Использование пешеходных галерей для снижения акустического и токсичного влияния
автомобильных дорог на здоровье людей и окружающую среду..... 114

БИОФИЗИКА

Отченашенко А.И., Корнеева В.В.

Анализ воздействия электростимуляции на восстановление хрящевой ткани..... 121

ПЕРСОНАЛИИ

Усачев С.М., Белькова Н.А.

К 85-летию профессора Шмитько Евгения Ивановича..... 135

ХРОНИКА

Рудаков О.Б., Артамонова О.В., Головинский П.А., Кукина О.Б.

Премия имени Гришманова И.А. присуждена профессору Перцеву В.Т..... 138

ХИМИЯ

УДК 544.236.2

ТЕРМОХИМИЯ СТЕКЛОВАНИЯ РАСПЛАВОВ

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*

Стеклообразное состояние вещества принято рассматривать как продукт вымораживания степеней свободы структурных единиц вещества, причём это состояние обычно предполагается более неравновесным, чем метастабильный переохлаждённый расплав того же вещества. Данный подход применим только к макромолекулярному стеклованию – затвердеванию жидкости, кристаллизация которой невозможна. Применение таких представлений к фазообразующему стеклованию приводит к противоречию, вынуждая принять, что для метастабильной фазы (переохлаждённого расплава) трансформация в ещё более неравновесное состояние термодинамически предпочтительнее релаксации до равновесного состояния. В представленной работе использован иной подход. Доказано, что в общем случае на линии плавления существует точка её прекращения, отделяющая область двухфазного равновесия «кристалл – жидкость» от области аморфных состояний. Термодинамическая возможность аморфизации вещества означает возможность его перехода в стеклообразную фазу. Фазообразующее стеклование представляет собой затвердевание расплава, термодинамически альтернативное по отношению к кристаллизации того же расплава, и является монотропным фазовым переходом IV рода. В работе найдена взаимосвязь термодинамических характеристик стеклообразователя в точке такого перехода, а также получено выражение зависимости температуры стеклования от скорости охлаждения расплава.

Ключевые слова: стеклование, фазообразование, монотропный фазовый переход, кинетика стеклования, уравнение стеклования, фазообразующее стеклование, макромолекулярное стеклование

THERMOCHEMISTRY OF MELTS VITRIFICATION

Ya.O. Shablowsky

*Gomel State Technical University,
Belorussia, 246746, Gomel, prosp. Oktyabrya, 48*

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

Vitreous (glassy) substances and materials are now quite ubiquitous and have innumerable applications. Nevertheless, the principal features of glassy state as well as its very nature are still the subject of endless discussions. Supercooled liquids and solutions can become so viscous that they solidify without crystallization and form glassy phases. Besides, modern high technologies deal with producing glasses upon rapid cooling. Since such condensed phases are metastable, one should apply the formalism of nonequilibrium thermodynamics to provide a rigorous and precise analysis of vitrification, but then it will turn out to be illegal of use the concept of the vitrification temperature. It is unacceptable for chemical technology therefore we regard the glassy state of a substance as its special phase while vitrification is considered as a particular phase transition. The paradigm of this kind enabled to reveal nontrivial laws of vitrification and to provide the kinetic equation of the vitrification.

Keywords: vitrification, phase forming, monotropic phase transition, vitrification kinetics, equation of vitrification, phase-forming vitrification, macromolecular vitrification

Введение. Среди конструкционных материалов стёкла занимают исключительное положение в силу уникальности их свойств [1]. Вместе с тем, стеклование – отнюдь не специфический процесс, свойственный специфическим веществам. У «классических» стеклообразователей различной химической при-

роды [2], органических композитов [3], полиметаллических систем [4] и т.д. обнаруживаются качественно идентичные закономерности стеклования. Единобразие этих закономерностей свидетельствует об их универсальности.

В общем случае высокотемпературная структурно разупорядоченная фаза при своём охлаждении трансформируется в низкотемпературную фазу с более упорядоченной структурой. Недавно авторы [5] доказали преемственность стеклообразного состояния вещества по отношению к его кристаллической фазе, из расплава которой данное стекло было получено. Такая преемственность означает, что стеклообразное состояние вещества можно рассматривать как особую фазу этого вещества, а стеклование – как фазообразующий процесс. Руководствуясь этим, в настоящей работе мы исследуем термодинамические закономерности стеклования расплавов.

Геометрическая термодинамика агрегатных фазовых равновесий

Полагая, что термодинамическое состояние вещества определяется заданием температуры T и давления p , будем различать характеристики смежных фаз вещества одним и двумя штрихами. Тогда линия фазового равновесия (λ -линия) отобразится кривой пересечения поверхностей $G'(T, p)$ и $G''(T, p)$ энергий Гиббса смежных фаз, а проекция λ -линии на (T, p) -плоскость ($\bar{\lambda}$ -линия) будет представлять собой зависимость $T_\lambda(p)$.

К фазовому переходу (ФП) N -го рода принято относить фазовое превращение, при котором в точке ФП непрерывны все частные производные энергии Гиббса до $(N - 1)$ -го порядка включительно. При нечётном порядке касания поверхности не пересекаются, поэтому в λ -точке поверхности $G'(T, p)$ и $G''(T, p)$ должны иметь касание чётного порядка, т.е. должно существовать такое натуральное число n , что в точке ФП совпадают все частные производные энергий Гиббса обеих фаз до $2n$ -го порядка включительно. Таким образом, между термодинамически равновесными фазами возможны переходы только нечётного рода:

$$N = 2n + 1, \quad n = 0, 1, 2, \quad (1)$$

При $N \geq 5$ у смежных фаз различаются свойства, соответствующие эффектам высших порядков, вследствие чего в точке ФП можно обнаружить только экстремумы зависимостей характеристик вещества от температуры и давления. Эти экстремумы окажутся тем более размыты, чем больше N .

При фазовых равновесиях III рода и соответствующих им ФП совпадают первые и вторые производные молярной энергии Гиббса, вследствие чего равновесие фаз – безразличное. Геометрически это проявляется в существовании в каждой точке λ -линии III рода асимптотического направления ФП, а в конечном итоге обуславливает нолевую кривизну $\bar{\lambda}$ -линии III рода: эта линия – прямая. То же верно для $\bar{\lambda}$ -линий высшего рода ($N > 3$), и данный факт далее будет иметь решающее значение при доказательстве равенства (11).

$\bar{\lambda}$ -линия I рода, напротив, не может быть прямой. При этом $\bar{\lambda}$ -линия I рода также не может иметь точек перегиба.

Указанное сочетание свойств обусловлено тем, что λ -линия I рода есть линия касания нолевого порядка поверхностей $G'(T,p)$ и $G''(T,p)$ и потому образована эллиптическими точками. Если точка поверхности – эллиптическая, то поверхность целиком располагается по одну сторону от плоскости, касающейся её в данной точке. Вследствие этого λ -линия I рода не может пересекаться своими касательными; соответственно, $\bar{\lambda}$ -линия I рода не может иметь точек перегиба. Огибающая семейства соприкасающихся плоскостей λ -линии I рода, будучи образована эллиптическими точками, заведомо не является линейчатой поверхностью. По этой причине λ -линия I рода имеет ненулевое кручение; соответственно, $\bar{\lambda}$ -линия I рода не может быть прямой.

Мерой выпуклости $\bar{\lambda}$ -линии I рода служит величина

$$\Omega_{\lambda} = \frac{d^2(\ln T_{\lambda})}{dp^2} = - \frac{\Delta V (\Delta V + T_{\lambda} \cdot V^{\circ} \cdot \Delta \alpha)}{\Theta^2} - \frac{V^{\circ} \cdot \Delta \beta}{\Theta}. \quad (2)$$

Здесь

$$\Delta V = V'_{\lambda} - V''_{\lambda}, \quad \Delta \alpha = \alpha'_{\lambda} - \alpha''_{\lambda}, \quad \Delta \beta = \beta'_{\lambda} - \beta''_{\lambda},$$

$$\alpha = \frac{1}{V^\circ} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad \beta = - \frac{1}{V^\circ} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T,$$

V – молярный объём, V° – молярный объём при стандартных условиях, Θ – молярная теплота ФП. Существенно, что $\Theta \neq 0$, т. к. инверсия величины Θ при движении фигуративной точки вдоль $\bar{\lambda}$ -линии агрегатного фазового равновесия невозможна, если зависимость $T_\lambda(p)$ однозначна.^{*)} Вместе с тем, на $\bar{\lambda}$ -линии равновесия «кристалл – жидкость» может существовать изохорная точка – точка инверсии величины скачка объёма ΔV , являющаяся экстремальной точкой зависимости $T_\lambda(p)$. Эта возможность имеет принципиальное значение: если на $\bar{\lambda}$ -линии имеется изохорная точка, то такая линия ограничена точкой прекращения фазового равновесия.

В самом деле, при переходе фигуративной точки $\bar{\lambda}$ -линии через изохорную точку этой линии изменяется знак у величины ΔV , тогда как знак величины $\Delta\beta$ при этом движении фигуративной точки измениться не может. Ввиду (2) симбатная инверсия величин ΔV и $\Delta\beta$ означала бы изменение знака Ω_λ (т.е. перегиб $\bar{\lambda}$ -линии), поэтому если на $\bar{\lambda}$ -линии имеется изохорная точка, то эта линия ограничена точкой вырождения, в которой достигается равенство

$$\Omega_\lambda = 0. \quad (3)$$

В силу невозможности перегиба $\bar{\lambda}$ -линия I рода не может продолжаться за точкой вырождения, которая таким образом оказывается точкой прекращения фазового равновесия.

В точке прекращения равновесия «кристалл – жидкость» нивелируются различия между кристаллическим состоянием вещества и его расплавом, т.е. имеет место аморфизация – образование изотропной твёрдой (сверхвысоковяз-

^{*)} Экспериментальная практика показывает, что это условие выполняется для любых расплавов за исключением гелиевых систем

кой) фазы. Термодинамическая возможность аморфизации вещества означает возможность его перехода в стеклообразную фазу, поэтому далее мы будем рассматривать фазообразующее стеклование как затвердевание расплава, термодинамически альтернативное по отношению к кристаллизации того же расплава.

Термодинамика стеклования

Стеклообразное состояние принято идентифицировать по превышению порога динамической вязкости:

$$\eta > \bar{\eta} = 10^B \text{ Па}\cdot\text{с},$$

где $B = 12$ для органических расплавов, $B = 13$ для неорганических расплавов. С учётом этого критерия отправной реперной точкой термодинамического анализа должна служить температура идеального стеклования \bar{T}_g , для которой по определению

$$\eta|_{T=\bar{T}_g} = \bar{\eta}. \quad (4)$$

Ход процесса стеклообразования определяется удалённостью начальной температуры T_0 охлаждаемого расплава от температуры идеального стеклования \bar{T}_g . Поскольку продукт этого процесса термодинамически равнодоступен при высокой скорости охлаждения, сочетающейся с малым временем релаксации, и при низкой скорости охлаждения, сочетающейся с большим временем релаксации, имеет место равенство

$$w\tau_r = \xi(T_0 - \bar{T}_g), \quad (5)$$

где w – скорость охлаждения расплава, τ_r – время релаксации, ξ – безразмерная константа.

Температуру идеального стеклования выразим, приняв, что динамическая вязкость расплава при его нагреве от точки плавления T_m убывает по закону

$$\eta = Z \exp[a(T_m/T)^b], \quad (6)$$

где

$$Z = \eta_m / e^a, \quad \eta_m = \lim_{T \rightarrow T_m} \eta(T),$$

a и b – положительные константы. Из (4), (6) получаем:

$$\bar{T}_g = T_m \cdot \left[\frac{a}{\ln(\bar{\eta}/Z)} \right]^{1/b}. \quad (7)$$

Чтобы определить время релаксации, вначале конкретизируем термодинамическую природу ФП стеклования. Для этого, применяя формализацию [6], оценим полную (гауссову) кривизну K_G поверхностей $G'(T, p)$ и $G''(T, p)$ энергий Гиббса смежных фаз.

Выше уже отмечалось, что энантиотропные ФП могут быть только нечётного рода {см. (1)}. Если же $N = 2n$, то при таких переходах касание изобарических профилей $G'(T)$ и $G''(T)$ имеет нечётный порядок, т.е. эти профили не пересекаются. Данный геометрический факт означает, что ФП чётного рода монотропны и могут иметь место только в случае, когда одна из смежных фаз термодинамически неравновесна. Именно такой случай реализуется при стекловании.

Если континуум неравновесных состояний вещества отображается поверхностью его энергии Гиббса $G(T, p)$, то у его энтропии S в любом таком состоянии разнонаправленные изобарические вариации равновероятны. Поскольку $S = -(\partial G / \partial T)_p$, в силу этой равновероятности поверхностная окрестность любой точки любого изобарического сечения поверхности $G(T, p)$ находится по обе стороны от плоскости, касающейся этой поверхности в данной точке. Сле-

довательно, область неравновесных состояний отображается на поверхности $G(T, p)$ гиперболическими точками.

Таким образом, точки ФП чётного рода суть точки касания поверхностей $G'(T, p)$ и $G''(T, p)$, одна из которых отображает континуум равновесных состояний и потому эллиптична ($K_G > 0$), а другая отображает континуум неравновесных состояний и потому гиперболична ($K_G < 0$). В итоге приходим к выводу: точки ФП чётного рода суть точки полевой полной кривизны:

$$K_G = 0. \tag{8}$$

Из (8) вытекает, что в точках ФП чётного рода и, в частности, в точке стеклования T_g должно выполняться соотношение

$$\left[\frac{\beta C_p}{\alpha^2} \right]_{T=T_g} = T_g V^\circ, \tag{9}$$

где C_p – изобарная теплоёмкость. Для проверки соотношения (9) мы рассчитали величину безразмерного параметра

$$\aleph = \frac{\left[\frac{\beta C_p}{\alpha^2} \right]_{T=T_g}}{T_g V^\circ}, \tag{10}$$

воспользовавшись экспериментальными данными [7]. Представленные в таблице 1 результаты этого расчёта показывают: в пределах экспериментальной погрешности $\aleph \approx 1$.

Таблица 1

Результаты расчёта по формуле (10)

| Вещество | \aleph | Вещество | \aleph |
|--------------------|----------|-----------------|----------|
| Селен | 1,024 | Глюкоза | 1,049 |
| Оксид бора | 0,988 | o-терфенил | 1,067 |
| Оксид германия(IV) | 0,983 | Полистирол | 1,094 |
| Глицерин | 1,054 | Поливинилацетат | 1,081 |

Известно [8, с. 54], что на опыте всегда наблюдаются непрерывные, и притом линейные, зависимости температуры стеклования от приложенного давления. Ввиду этого обстоятельства стеклованию соответствует ФП высокого чётного рода:

$$N = 2n, \quad (11)$$

где $n > 1$. В то же время,

$$N \leq 4. \quad (12)$$

В самом деле, обсуждаемый ФП не может быть выше четвёртого рода, поскольку в противном случае невозможны макроскопические проявления термодинамических различий смежных фаз. Сопоставляя (11) и (12), заключаем: стеклование должно рассматриваться как ФП IV рода.

Кинетика стеклования

Итоговый вывод предыдущего раздела имеет принципиальное значение. При ФП четвёртого и более высокого рода вырождаются температурные зависимости феноменологических параметров релаксационной теории стеклования [9], [10], благодаря чему упрощается получаемое на основе этой теории выражение для времени релаксации:

$$\tau_r = \bar{\tau} \exp\left(\frac{\bar{T}_g - T}{\sigma + T - \bar{T}_g}\right), \quad (13)$$

где $\bar{\tau} = \tau_r|_{T=\bar{T}_g}$. А именно, применительно к нашему случаю в выражении (13)

будем иметь $\sigma = \text{const}$.

Подставляя (13) в (5), получаем выражение зависимости температуры стеклования T_g от скорости охлаждения расплава:

$$T_g = \bar{T}_g + \frac{\sigma \ln(\zeta w / (T_0 - \bar{T}_g))}{1 - \ln(\zeta w / (T_0 - \bar{T}_g))}, \quad (14)$$

где $\zeta = \bar{\tau}/\xi$, а \bar{T}_g определяется равенством (7). Параметры уравнения (14) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры уравнения (14) для важнейших стеклообразователей

| Вещество | \bar{T}_g , К | T_m , К | σ , К | ζ | Литературный источник |
|---|-----------------|-----------|--------------|---------|-----------------------|
| Se | 364.5 | 494.3 | 63.46 | 29.21 | [11] |
| As ₂ S ₃ | 549.0 | 583.2 | 96.73 | 11.56 | [12] |
| As ₂ Se ₃ | 540.2 | 641 | 103.1 | 109.07 | [13] |
| B ₂ O ₃ | 574.4 | 722 | 36.04 | 230.26 | [14] |
| BeF ₂ | 674.9 | 825 | 68.11 | 126.98 | [15] |
| GeO ₂ | 1083 | 1388.2 | 354.0 | 16.48 | [16] |
| ZnCl ₂ | 415.7 | 556 | 45.98 | 104.52 | [17] |
| Na ₂ B ₄ O ₇ | 786.9 | 1015.7 | 57.40 | 152.84 | [18] |
| TlAsSe ₂ | 420.8 | 578.2 | 63.80 | 440.25 | [12] |
| Этанол | 106.2 | 159 | 10.66 | 1.27 | [19] |
| Этиленгликоль | 171.5 | 260.3 | 21.03 | 43.87 | [20] |
| Глицерин | 267.4 | 291.3 | 92.56 | 2.70 | [21] |
| Сорбитол | 317.1 | 368.2 | 56.48 | 5.16 | [22] |
| o-Терфенил | 295.7 | 329.4 | 55.42 | 0.78 | [23] |
| Фенил салицилат | 276.3 | 316.2 | 66.11 | 1.36 | [24] |

Типичный вид термокинетической кривой $T_g(w)$ показан на рис. 1. Зависимость $T_g(w)$ для расплава $2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 3\text{KNO}_3$ рассчитана по уравнению (14) при $\bar{T}_g = 384.1$ К, $T_m = 438.2$ К, $\sigma = 55.80$ К, $\zeta = 5.57$ и сопоставлена с экспериментальными данными [25].

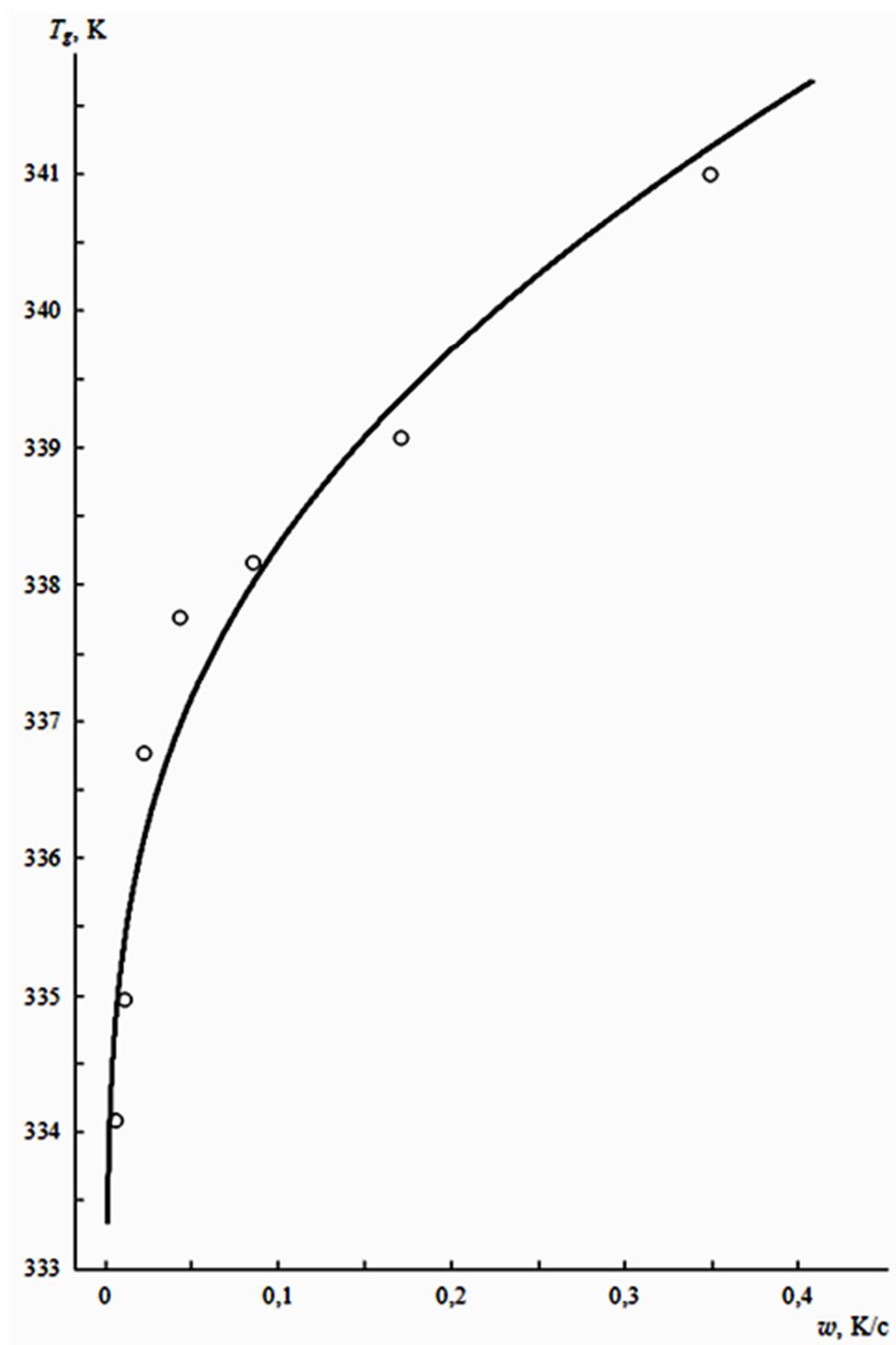


Рис. 1. Кинетика стеклования расплава $2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2-3\text{KNO}_3$: сплошная линия – расчёт по формуле (14), точки – экспериментальные данные [25]

В завершение вернёмся к равенствам (2), (3). Этими равенствами предопределяется существование на линиях плавления точек их прекращения, отделяющих область двухфазного равновесия «кристалл – жидкость» от области аморфных состояний. Термодинамическая возможность аморфизации вещества

означает возможность его перехода в стеклообразную фазу, поэтому закономерно, что области аморфизации были обнаружены экспериментально [26], [27] на фазовых диаграммах типичных стеклообразователей как области твёрдого состояния, термодинамически альтернативного по отношению к кристаллической фазе.

Фазообразующее стеклование естественно противопоставить макромолекулярному стеклованию – затвердеванию жидкости, кристаллизация которой невозможна. Макромолекулярное стеклование происходит в результате протекания процессов, стабилизирующих конформации макромолекул. Практика экспериментальных исследований свидетельствует, что такие стеклообразующие процессы имеют размытый непороговый характер [28], т.е. в контексте применяемой здесь формализации [см. обсуждение равенств (1), (11), (12)] соответствуют ФП высшего чётного рода. Это позволяет описать температурную зависимость времени релаксации макромолекулярных стеклообразователей равенством (13). Вместе с тем, вопрос о кинетическом уравнении макромолекулярного стеклования пока остаётся открытым.

В отличие от фазообразующего стеклования, макромолекулярное стеклование не детерминируется универсальными закономерностями, вследствие чего термодинамически строгое определение температуры стеклования полимера не представляется возможным. На современном этапе принята точка зрения [29], согласно которой полимеры переходят в стеклообразное состояние не в точке стеклования, а в интервале стеклования, границами которого служат температуры замораживания больших и малых флуктуаций плотности. Отмеченная особенность проиллюстрирована на рисунке 2. Кривая 1 построена для аморфного α -селена Se_8 по указанным в таблице 2 параметрам уравнения (14) в сравнении с экспериментальными данными [11]. Кривая 2 усредняет кинетическую зависимость интервалов стеклования, измеренных в работе [11] для полимеризованного селена.

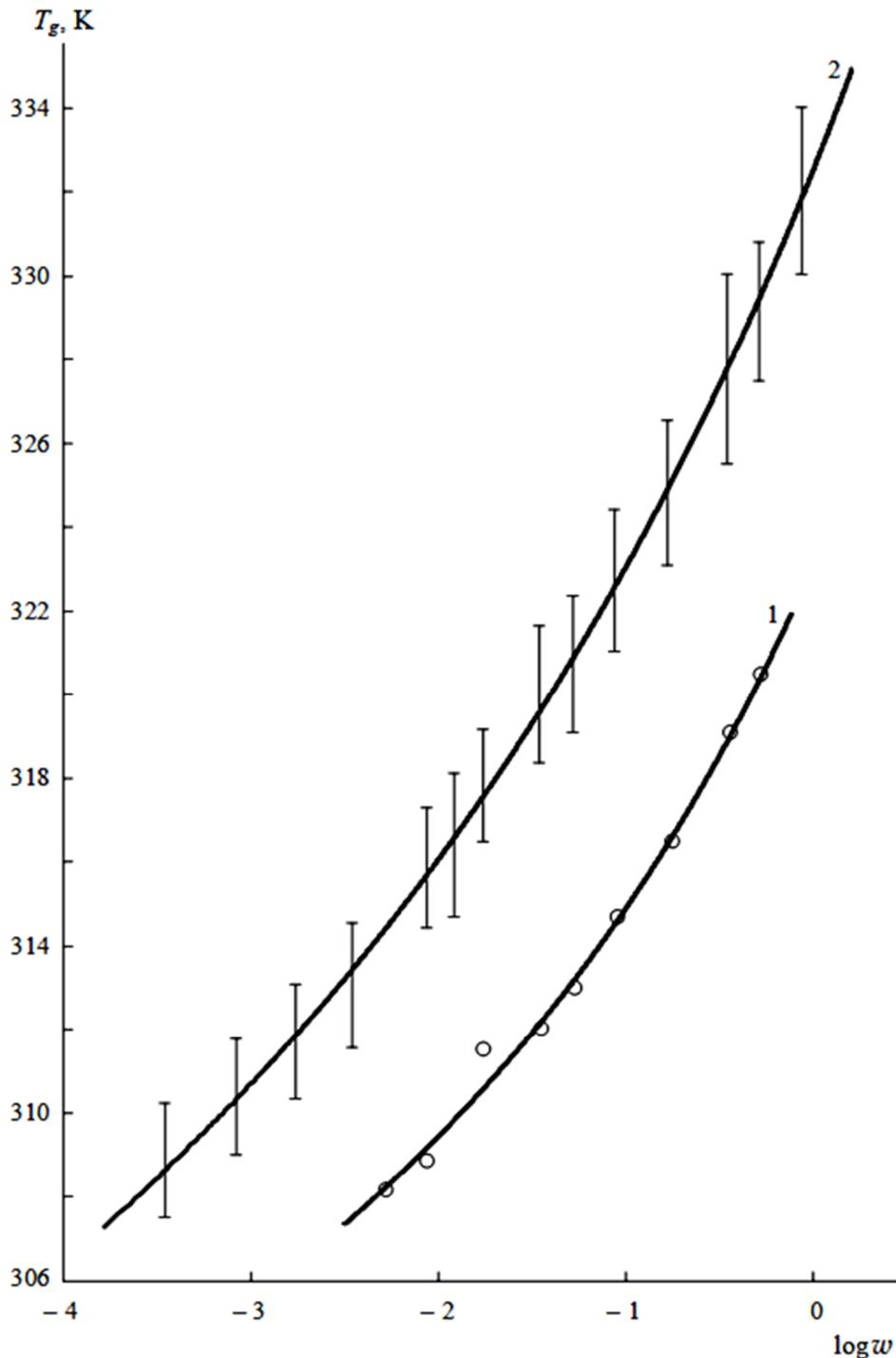


Рис. 2. Кинетика стеклования аллотропных модификаций селена по данным [11]:
1 – Se₈, 2 – полимерный селен

Заключение. Равенствами (2), (3) предопределяется существование на линии плавления точки её прекращения, отделяющей область двухфазного равновесия «кристалл – жидкость» от области аморфных состояний. Термодинамическая возможность аморфизации вещества означает возможность его перехода в стеклообразную фазу. Такое фазообразующее стеклование представляет

собой затвердевание расплава, термодинамически альтернативное по отношению к кристаллизации того же расплава.

Фазообразующее стеклование есть монотропный ФП IV рода [см. равенства (1), (12)]. В точке такого ФП выполняется соотношение (9).

Зависимость температуры стеклования от скорости охлаждения расплава выражается уравнением (14). Параметры этого уравнения (14) для важнейших однокомпонентных стеклообразователей даны в таблице 2.

Список литературы

1. Семериков И.С., Герасимова Е.С. Физическая химия строительных материалов. М.: Юрайт, 2019. 204 с.
2. Сандитов Д.С., Машанов А.А. О некоторых закономерностях процесса стеклования аморфных веществ // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 681–683.
3. Глазков С.С., Рудаков О.Б. Хемосорбционные процессы при создании целлюлозосодержащих композитов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9, № 1. С. 67–73.
4. Косилов А.Т., Вахмин С.Ю. Атермические и термоактивационные процессы при стекловании металлических стёкол // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2015. Т. 2. № 1 (6). С. 321–322.
5. Митрофанов Ю.П., Кобелев Н.П., Хоник В.А. О связи свойств металлических стёкол и материнских кристаллов // Физика твёрдого тела. 2019, Том 61, № 6, С. 1040–1046.
6. Шабловский Я.О. Геометрическая интерпретация фазовых равновесий кристалл – пар и равновесий в гелиевых системах // Журн. физ. химии. 2009. Т. 83, № 6. С. 1039–1045.
7. Tang, M. B., Wang W. H., Xia L., Zhao J. Constant-volume heat capacity at glass transition // Journal of Alloys and Compounds. 2013. Vol. 577. P. 299–302.
8. Айбиндер С.Б., Алксне К.И., Тюнина Э.Л., Лака М.Г. Свойства полимеров при высоких давлениях. М.: Химия, 1973. 190 с.

9. Adam G., Gibbs J.H. On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass forming liquids // *Journal of Chemical Physics*. 1965. Vol. 43, № 1. P. 139–146.
10. Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids // *Journ. Amer. Chem. Soc.* 1955. Vol. 77, № 14. P. 3701–3707.
11. Yannacopoulos S., Kasap S.O. Glass transformation phenomena in bulk and film amorphous selenium via DSC heating and cooling scans // *Journal of Materials Research*. 1990. Vol. 5, № 4. P. 789–794.
12. Коломиец Б.Т., Листошин Б.В. Зависимость температуры стеклования халькогенидных стёкол от скорости нагревания // *Физика и химия стекла*. 1984. Т. 10, № 6. С. 667–675.
13. Коломиец Б.Т., Любин В.М., Шило В.П. О температуре размягчения стекла As_2Se_3 // *Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы*. 1971. Т. 7, № 5. С. 858–859.
14. Dependence of the glass transition temperature on heating and cooling rate / C. T. Moynihan [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry*. 1974. Vol. 78, № 26. P. 2673–2677.
15. Доброхотова Ж.В., Захарова Б.С. Исследование стёкол систем $LiF-BeF_2$ и $KF-BeF_2$ методом дифференциальной сканирующей калориметрии // *Неорганические материалы*. 2000. Т. 36, № 2. С. 247–253.
16. Brüning R., Crowell T. A method to determine the kinetics of a supercooled liquid by temperature scanning measurements applied to (Li,Na)acetate and GeO_2 // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1999. Vol. 248, № 2/3. P. 183–193.
17. Structure of $ZnCl_2$ melt. Part II: fragile-to-strong transition in a tetrahedral liquid / P. Lucas [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2017. Vol. 121, № 49. P. 11210–11218.
18. Maeda M., Ikeda T. The glass transition and crystallization of amorphous $[xLi_2O \cdot (1-x)Na_2O]-2B_2O_3$ // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1988. Vol. 49, № 1. P. 35–39.

19. Kabtoul B., Ramos M.A. Structural and enthalpy relaxation processes in pure ethanol // *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. 2011. Vol. 208, № 10. P. 2249–2253.
20. Rasmussen D.H., MacKenzie A.P. Glass transition in amorphous water. Application of the measurements to problems arising in cryobiology // *The Journal of Physical Chemistry*. 1971. Vol. 75, № 7. P. 967–973.
21. McMillan J.A. Kinetics of glass transformation by thermal analysis. I. Glycerol // *The Journal of Chemical Physics*. 1965. Vol. 42, № 10. P. 3497–3501.
22. Influence of heating and cooling rates on the glass transition temperature and the fragility parameter of sorbitol and fructose as measured by DSC / D. Simatos [et al.] // *Journal of Thermal Analysis*. 1996. Vol. 47, № 5. P. 1419–1436.
23. Crowley K.J., Zografi G. The use of thermal methods for predicting glass-former fragility // *Thermochimica Acta*. 2001. Vol. 380, № 2. P. 79–93.
24. Moura-Ramos J.J., Correia N.T., Diogo H.P. Vitrification, nucleation and crystallization in phenyl-2-hydroxybenzoate (salol) studied by Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermally Stimulated Depolarisation Currents (TSDC) // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2004. Vol. 6, № 4. P. 793–798.
25. Dependence of the fictive temperature of glass on cooling rate / C. T. Moynihan [et al.] // *Journal of the American Ceramic Society*. 1976. Vol. 59, № 1/2. P. 12–16.
26. Sharma S.M., Sikka S.K. Pressure induced amorphization of materials // *Progress in Materials Science*. 1996. Vol. 40, № 1. P. 1–77.
27. Mc Millan P.F. Materials from extreme conditions // *Comprehensive Inorganic Chemistry II*. Volume 4. Elsevier, 2013. P. 17–46.
28. Вшивков С.А. Фазовые переходы полимерных систем во внешних полях. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 368 с.
29. Бартнев Г.М., Ломовской В.А. Особые температурные точки в области стеклования линейных полимеров // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 1992. Т. 34, № 11. С. 36–46.

References

1. Semerikov I.S., Gerasimova E.S. Fizicheskaja himija stroitel'nyh materialov. M.: Yurajt, 2019. 204 p. (in Russian)
2. Sanditov D.S., Mashanov A.A. On some features of glass transition in amorphous substances. Doklady Physical Chemistry, 2017, vol. 477, no. 2. P. 231–234.
3. Glazkov S.S., Rudakov O.B. Hemosorbcionnye processy pri sozdanii celljulozosoderzhashhih kompozitov. Sorbcionnye i hromatograficheskie processy, 2009, vol. 9, no. 1. P. 67–73. (in Russian)
4. Kosilov A.T., Vahmin S.Ju. Atermicheskie i termoaktivacionnye processy pri steklovanii metallicheskih stjokol. Pozharnaja bezopasnost': problemy i perspektivy, 2015, vol. 2, no. 1 (6). P. 321–322. (in Russian)
5. Mitrofanov Yu.P., Kobelev N.P., Honik V.A. O svjazi svojstv metallicheskih stjokol i materinskih kristallov. Physics of the Solid State, 2019, vol. 61, no. 6. P. 962–968. (in Russian)
6. Shablovsky Ya.O. Geometrical interpretation of crystal-vapor phase equilibria and equilibria in helium systems Russian Journal of Physical Chemistry A, 2009, vol. 83, no. 6. P. 907–912.
7. Tang, M. B., Wang W. H., Xia L., Zhao J. Constant-volume heat capacity at glass transition. Journal of Alloys and Compounds, 2013, vol. 577. P. 299–302.
8. Ajbinder S.B., Alksne K.I., Tjunina E.L., Laka M.G. Svojstva polimerov pri vysokih davlenijah. M.: Himija, 1973. 190 p. (in Russian)
9. Adam G., Gibbs J.H. On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass forming liquids. Journal of Chemical Physics, 1965, vol. 43, no. 1. P. 139–146.
10. Williams M. L., Landel R. F., Ferry J. D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass - forming liquids. Journ. Amer. Chem. Soc., 1955, vol. 77, no. 14. P. 3701–3707.

11. Yannacopoulos S., Kasap S. O. Glass transformation phenomena in bulk and film amorphous selenium via DSC heating and cooling scans. *Journal of Materials Research*, 1990, vol. 5, no. 4. P. 789–794.
12. Kolomic B.T., Listoshin B.V. Zavisimost' temperatury steklovanija hal'kogenidnyh stjokol ot skorosti nagrevanija. *Fizika i himija stekla*, 1984, vol. 10, no. 6. P. 667–675. (in Russian)
13. Kolomic B.T., Ljubin V.M., Shilo V.P. O temperature razmjagchenija stekla As_2Se_3 . *Izvestija Akademii nauk SSSR. Neorganicheskie materialy*, 1971, vol. 7, no. 5. P. 858–859. (in Russian)
14. Dependence of the glass transition temperature on heating and cooling rate / C. T. Moynihan [et al.]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1974, vol. 78, no. 26. P. 2673–2677.
15. Dobrohotova Zh.V., Zaharova B.S. Issledovanie stjokol sistem $LiF-BeF_2$ и $KF-BeF_2$ metodom differencial'noj skanirujushhej kalorimetrii. *Neorganicheskie materialy*, 2000, vol. 36, no. 2. P. 247–253. (in Russian)
16. Brüning R., Crowell T. A method to determine the kinetics of a supercooled liquid by temperature scanning measurements applied to (Li,Na)acetate and GeO_2 . *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, vol. 248, no. 2/3. P. 183–193.
17. Structure of $ZnCl_2$ melt. Part II: fragile-to-strong transition in a tetrahedral liquid / P. Lucas [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2017. Vol. 121, no. 49. P. 11210–11218.
18. Maeda M., Ikeda T. The glass transition and crystallization of amorphous $[xLi_2O \cdot (1-x)Na_2O]-2B_2O_3$. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1988, vol. 49, no. 1. P. 35–39.
19. Kabtoul B., Ramos M.A. Structural and enthalpy relaxation processes in pure ethanol. *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*, 2011, vol. 208, no. 10. P. 2249–2253.
20. Rasmussen D.H., MacKenzie A.P. Glass transition in amorphous water. Application of the measurements to problems arising in cryobiology. *The Journal of Physical Chemistry*, 1971, vol. 75, no. 7. P. 967–973.

21. McMillan J.A. Kinetics of glass transformation by thermal analysis. I. Glycerol. *The Journal of Chemical Physics*, 1965, vol. 42, no. 10. P. 3497–3501.
22. Influence of heating and cooling rates on the glass transition temperature and the fragility parameter of sorbitol and fructose as measured by DSC / D. Simatos [et al.]. *Journal of Thermal Analysis*, 1996, vol. 47, no. 5. P. 1419–1436.
23. Crowley K.J., Zografi G. The use of thermal methods for predicting glass-former fragility. *Thermochimica Acta*, 2001, vol. 380, no. 2. P. 79–93.
24. Moura-Ramos J.J., Correia N.T., Diogo H.P. Vitrification, nucleation and crystallization in phenyl-2-hydroxybenzoate (salol) studied by Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermally Stimulated Depolarisation Currents (TSDC). *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2004, vol. 6, no. 4. P. 793–798.
25. Dependence of the fictive temperature of glass on cooling rate / C. T. Moynihan [et al.]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1976, vol. 59, no. 1/2. P. 12–16.
26. Sharma S.M., Sikka S.K. Pressure induced amorphization of materials. *Progress in Materials Science*, 1996, vol. 40, no. 1. P. 1–77.
27. McMillan P.F. Materials from extreme conditions. *In Comprehensive Inorganic Chemistry II. Volume 4*. Elsevier, 2013. P. 17–46.
28. Vshivkov S.A. Fazovye perehody polimernykh sistem vo vneshnih poljah. Sankt-Peterburg: Lan', 2013. 368 p. (in Russian)
29. Bartenev G.M., Lomovskoy V.A. Particular temperature points near the glass transition of linear polymers. *Polymer Science, Series B*, 1992, vol. 34, no. 11. P. 36–46.

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

ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРЕРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

УДК 538.9

**СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК**

А.Л. Петров, С.С. Агнаев, А.Н. Хаглеев*

*Восточно-Сибирский государственный университет,
Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская 40В стр.1*

**Адрес для переписки: Петров Артем Львович,
E-mail: artempetrov0331@mail.ru*

В статье рассмотрены виды модификации полиэтилена с формированием поверхностной структуры для взаимодействия с адгезивами. Оценено влияние модификации на физико-механические, оптические и прочностные свойства полиэтилена. Показано снижение прочностных свойств полимерных пленок с применением химической модификации. Экспериментально доказано, что при плазменной модификации скользящей дуги, улучшаются адгезионные свойства поверхности пленок ПЭНД и ПЭВД.

Ключевые слова: адгезия, плазменная модификация, полиэтилен

**WAYS TO IMPROVE THE ADHESIVE PROPERTIES OF THE SURFACE
OF POLYETHYLENE FILMS**

A.L. Petrov, S.S. Agnaev, A.N. Hagleev*

*East Siberian State University of Technology and Management,
Russian Federation, Ulan-Ude, ul. Klyuchevskaya 40B, p.1*

**Address for correspondence: PetrovArtemLvovich,*

E-mail: artempetrov0331@mail.ru

The article considers the types of modification of polyethylene with the formation of a surface structure for interaction with adhesives. The effect of the modification on the physicomechanical, optical and strength properties of polyethylene is estimated. A decrease in the strength properties of polymer films with the use of chemical modification is shown. It has been experimentally proved that with plasma modification of the sliding arc, the adhesive properties of the surface of HDPE and HDPE films are improved.

Keywords: adhesion, plasma modification, polyethylene

Введение. На сегодняшний день полимеры являются востребованными и перспективными материалами. Ежегодно увеличивающийся объем потребления полимеров в промышленности, медицине, строительстве, обусловлен рядом свойств: стойкость к действию агрессивных сред и радиации; высокая прочность при низкой плотности, за счёт чего снижается масса готового изделия. Наиболее распространенным среди полимеров является полиэтилен (ПЭ), обладающий высокими эксплуатационными свойствами благодаря структуре, представляющей собой карбоцепный алифатический непредельный углеводород олефинового ряда – этилена, относящийся к группе полиолефинов (C_2H_4 , C_3H_6 , C_4H_8 и других альфа-олефинов).

Для изготовления ПЭ применяют полимеризацию, которая происходит за счёт разрушения неустойчивых циклов и соединения их в длинные цепи или при раскрытии кратных связей в ненасыщенных низкомолекулярных веществах. Конечный состав вещества соответствует исходному, так как в ходе реакции не выделяется побочных продуктов. Для полимеризации характерно уменьшение общего числа молекул, однако средняя молекулярная масса увеличивается, также для реакции свойственно понижение степени насыщенности реагирующих веществ. В зависимости от природы активного участка различают радикальную полимеризацию, в которой активным участком является свобод-

ный радикал, и ионную полимеризацию, где активным участком является индуцированный ион [1].

Радикальную полимеризацию применяют для получения ПЭ высокого давления (ПЭВД). Из конденсированной газовой фазы при давлении 150-350 МПа, в присутствии инициаторов на основе кислорода или органических пероксидов образуется продукт. Полученный ПЭВД, содержащий значительное число разветвленных звеньев в цепи, обладает большей эластичностью, плотностью, а также возможности эксплуатации при температурах до 110°C. Основным преимуществом ПЭВД является диэлектрические свойства, так как в процессе полимеризации отсутствуют катализаторы, в отличие от ионной полимеризации [1].

Ионная полимеризация протекает с участием катализатора, который в отличие от инициатора, не расходуется в процессе полимеризации и не является частью полимера. Данная реакция происходит путем образования карбонатных или карбидных ионов и последующего переноса положительных или отрицательных зарядов вдоль цепи, в отличие от радикальной полимеризации, которая происходит путем переноса неспаренных электронов вдоль цепи. Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) изготавливают в суспензии органического растворителя (гексан, бензин) и в присутствии металлоорганических катализаторов Циглера-Натты: $TiCl_4$ и AlR_3 при параметрах давления и температуры в диапазоне 0,2-0,5 МПа, 70-80°C соответственно [2]. В результате полученный ПЭНД (высокой плотности), по сравнению с ПЭВД синтезированный по методу радикальной полимеризации, обладает рядом преимуществ: высокая прочность, не выделяет токсичных веществ, а также, благодаря линейному строению и высокой степени кристалличности, термической устойчивостью с температурой эксплуатации до 115°C [1].

По сравнению с ПЭВД в изготовлении полиэтилена среднего давления (ПЭСД) используют растворитель (ксилон, циклогексан), в котором содержится около 0,5% катализатора (окислы хрома, молибдена, ванадия) и до 5% этилена. При выдержке параметров давления 3,5-4,0 МПа и температуры 130-170°C, по-

лученный ПЭСД обладает меньшей газопроницаемостью, имеет низкое полимеризационное давление, что устраняет опасность взрывчатого разложения этилена, а также отсутствие токсичного и взрывоопасного металлорганического катализатора [1].

Несмотря на разные способы синтеза ПЭ, можно выделить неизменные отличительные свойства: высокая водонепроницаемость, диэлектрическая стойкость, возможность эксплуатации при температурах до -70°C , а также стойкость к воздействию концентрированных кислот и щелочей.

Однако, применение ПЭ при изготовлении полимерно-композиционных материалов (ПКМ) ограничено из-за низкого значения поверхностной энергии, плохой смачиваемости растворителями, плохого склеивания и низкой адгезии. Для решения данной проблемы применяют газопламенную, химическую, плазменную, и механическую модификацию с целью изменения химического состава и структуры поверхности ПЭ, обуславливающих улучшение адгезионных свойств.

Химическая модификация поверхности ПЭ осуществляется путем травления кислотами, органическими и щелочными растворами, с образованием активных центров и функциональных групп, способных взаимодействовать с адгезивом. Адгезия характеризуется природой контактных фаз, свойствами площади, взаимодействующей поверхности. Зависимость определяется межмолекулярными силами притяжения и усиливается при электрическом заряджении одно или двух тел, когда при взаимодействии тел образуется донорно-акцепторная связь, а также при капиллярной конденсации паров. Определяющими характеристиками адгезии является химическая природа наполнителя и его способность к взаимодействию со связующим, а также тип и количество функциональных групп на поверхности. Образование и разрушение адгезивных соединений объясняются на основе адсорбционной и термодинамической теорией. Адсорбционный подход предусматривает когезионные свойства субстратов и адгезивов, а также условия их контакта. В термодинамической теории

рассматриваются межфазные границы, а также поверхностная энергия субстрата и адгезива. [2].

Так, в работе [3] Способ получения активированной поверхности полиэтилена, для улучшения адгезионных свойств ПЭ, исследовано влияние роданида железа ($\text{Fe}(\text{CNS})_3$) в растворе дистиллированной воды. Раствор роданида железа - комплексное соединение, взаимодействующее с атомами углерода, при котором мицеллы формируются так, что их гидрофильные концы направлены наружу, а гидрофобные – внутрь, поэтому растворимость мицелл в водной фазе увеличивается. Создание устойчивой гидрофильной поверхности достигается нанесением на обезжиренную поверхность ПЭ раствора роданида железа, концентрацией 3-7 %. Концентрация менее 3 % не обеспечивает образование сплошной гидрофильной поверхности ПЭ, что приводит к снижению прочности связи, вместе с тем повышение концентрации (более 7 %) экономически нецелесообразно и не приводит к повышению прочности связи, зависящее от достижения максимального количества гидрофильных групп на единицу площади поверхности ПЭ. При концентрации роданида железа в растворе 3-7 % с клеем К-153, значения предела прочности при отрыве стали-3 от полиэтилена варьируются в диапазоне 245-378 Н/м², что является достаточно высоким показателем [4].

Известен способ [4] увеличения адгезии пленок ПЭ в растворе бихромата натрия $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и серной кислоте (H_2SO_4), при котором вследствие травления и дальнейшего взаимодействия с воздухом на поверхности и в объеме пленки ПЭ образуются ненасыщенные ($\text{C}=\text{C}$), гидроперекисные ($\text{O}-\text{OH}$), гидроксильные (OH), карбоксильные (COOH) функциональные группы. Данная модификация протекала при температуре 80-85°C в течение 2-3 мин. и привела к улучшению смачиваемости поверхности и улучшению адгезионных свойств.

Ключевыми недостатками химической модификации является: соблюдение дополнительных мер безопасности, т.к. большинство химических реагентов токсичные, пожаро и взрывоопасные, необходимость промывки поверхности ПЭ от токсичных реагентов; сушки поверхности. Кроме того, химическая мо-

дификация приводит к расслаиванию материала, а также к снижению прочностных свойств, связанных с глубиной модификации по всему объему полимерной пленки.

Плазменная модификация в отличие от химической модификации приводит к рыхлению и образованию неровностей на поверхности ПЭ, и не влияет негативно на механическую прочность материала.

Плазменная модификация образует активные центры при разрыве связей на поверхности модифицируемого материала, за счет соударения заряженных частиц, ионизированным электрическим полем, с более тяжелыми частицами, входящих в состав соединения материала. Образование новых функциональных групп (гидроксильные, карбоксильные), способных взаимодействовать с клеевым составом, достигается тем, что модификация происходит в взаимодействии с внешней средой или газом.

В работе [5] было исследовано изменение адгезионных характеристик и свойств полимеров под воздействием холодной плазмы низкого давления. При плазменной модификации на поверхность воздействует поток ионизированных частиц а также кванты ультрафиолетового излучения. Модификация способствовала увеличению скорости химических превращений аморфных областей, в отличие от кристаллических, вследствие чего возникла более развитая структура поверхности, за счет возрастания степени кристалличности поверхностного слоя. В заключении авторы пишут, что структурные изменения приводят к улучшению оптических, механических и адгезионных свойств поверхности, за счет химических превращений, модификацией плазмы низкого давления, в поверхностном слое полимера.

В работе [6] было исследовано изменение характеристик и свойств полимерных пленок под воздействием тлеющего разряда. В данном исследовании использовались промышленные пленки из политетрафторэтилена (ПТФЭ) с исходным краевым углом смачивания (θ) 1200, сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом (Ф-4МБ) с $\theta = 1080$ и поливинилиденфторида (ПВДФ) с исходным значением $\theta = 800$. Модификация пленок проводилась в проточном

режиме при давлении 13 Па и величине постоянного тока 50 мА в течение 10-60 с. Модифицированные на катоде пленки ПТФЭ и Ф4МБ характеризуется значительно низкой величиной θ равным 330 и 200 соответственно, в отличие от модификации на аноде, при которой θ равны 490, однако у пленки ПВДФ значительно меньший θ , при модификации на аноде и составляет 100. В результате модификации поверхность пленки приобрели гидрофильные свойства, а поверхностная энергия значительно увеличилась, причем основное изменение связано с увеличением содержания полярных компонентов. Существенно возрастает поверхностная энергия, основные изменения происходят за счет увеличения полярного компонента. Так для перфторированных пленок ПТФЭ и Ф4МБ наибольшее изменение химического состава поверхности наблюдается при воздействии отрицательного разряда (модификация на аноде) со значениями θ равным 330 и 200 соответственно, тогда как для водородсодержащей пленки ПВДФ значение θ при модификации на катоде составило 100, что автор связывает с более высокой интенсивностью модификации вблизи катода.

Однако при длительном хранении переориентация полярных групп с поверхности плазменно-модифицированной пленки уменьшают эффект гидрофилизации из-за термодинамической релаксации. Так [7] в работе было установлено, что высокочастотная плазменная модификация ПЭ в атмосфере остаточного воздуха менее эффективна, чем в атмосфере насыщенного водяного пара, ввиду большего эффекта гидрофилизации поверхности, а также было выявлено, что ослаблением эффекта «старения» может являться тепловая модификация образцов непосредственно в процессе их плазменного модифицирования. Установленные образцы пленок ПЭ толщиной 160 мкм размещали в камере между электродами в среде воздуха и водяного пара. Высокочастотная плазменная обработка ПЭ, нагретого до температуры 60-80°C, в атмосфере влажного воздуха, способствует стабилизации поверхностных свойств, приводящих к улучшению адгезии поверхности пленки. В поверхностном слое ПЭ, из-за длительного хранения на воздухе, процесс перестройки полярных групп ослабляется, что приводит к более длительному процессу старения.

В работах [8] установлено, что увеличение адгезионной способности полимерных пленок образуется за счёт преобразования микрорельефа поверхности в процессе коронной модификации. Для исследования в качестве материалов использовались термоусадочные 9-слойные пленки ПБ М-50 толщиной 55 мкм и ПБ С47 толщиной 50 мкм, модифицированные дозой в 120 Вт·мин/м². Авторы с помощью атомно-силовой микроскопии доказали, что, независимо от типа полимера, на поверхности пленок образуются структуры в виде выступов и неровностей. Увеличение шероховатости поверхности в 1,5 раза подтверждает, что воздействие коронного разряда на поверхность, в значительной степени, увеличивает поверхностную энергию и значительно улучшает адгезионные свойства полимерных пленок.

При плазменной модификации существует необходимость в дополнительных мерах безопасности, так как при работе присутствует высокое напряжение и большое содержание озона, что негативно сказывается на персонал. Однако приведенные выше работы доказывают, что плазменная модификация улучшает адгезионные свойства полимерных пленок, способствуя сохранить прочностные и оптические свойства полимера ввиду отсутствия температурного воздействия и небольшой глубины обработки.

Методы и объекты исследования. В качестве объекта исследования были использованы ПЭ пленки: - ПЭВД согласно ГОСТ 16337-77 толщиной 60 мкм; - ПЭНД согласно ГОСТ 16338-85 толщиной 60 мкм.

Модификация ПЭ пленок осуществлялась в течение 5 с при токе 50 мА, импульсном напряжении 8 кВ и частоте 15 кГц, на разработанной плазменной установке – патент RU2781708C1 [9]. Для создания скользящего дуги в корпус из компрессора направляется поток воздуха, обтекающий электроды и создающий плазменный поток, продвигаемый в направлении модифицируемой ПЭ пленки.

Для оценки изменения структуры поверхности и ее контактных свойств полимерные материалы исследуют методами: лежащей капли (рис.1), висящей капли (оптический метод), тензометрическим методом измерения смачивания, а также с помощью сканирующего режима атомно-силового микроскопа.

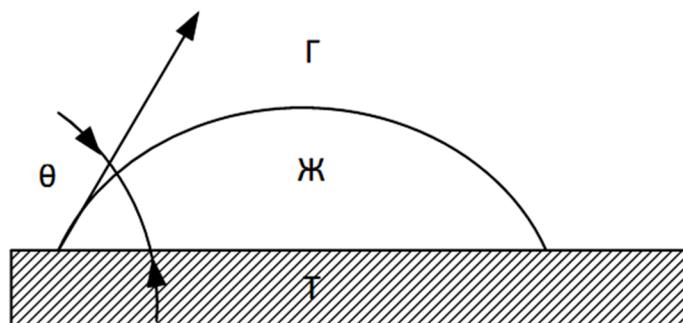


Рис. 1. Метод лежащей капли: краевой угол смачивания – θ ;
газообразная фаза – г, жидкая фаза – ж; твердая фаза – т

Основной характеристикой гидрофильности поверхности является краевой угол смачивания (θ). Среди большого выбора исследований θ наиболее целесообразным является метод, основанный на измерении угла между плоскостью поверхности материала и жидкости. Данный метод относится к статическим способам определения краевого угла смачивания, так при полном не смачивании поверхности угол равен 180 градусов, а при полном смачивании угол равен 0 градусов соответственно. Для определения значения θ необходимо между смачиваемой поверхностью и жидкостью провести касательную, которая образует искомый угол. Адгезионные свойства ПЭ пленок исследованы установкой для измерения θ (рис.2) с программным обеспечением TopView, и с помощью цифрового микроскопа DM, методом краевого угла смачивания до и после модификации.

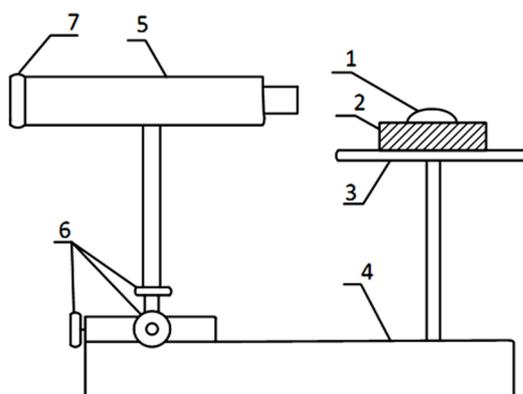
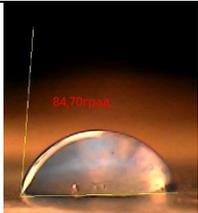
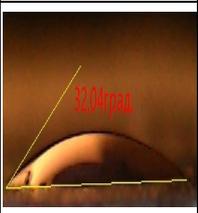
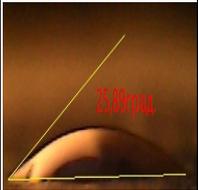


Рис. 2. Схема установки для измерения краевого угла смачивания поверхности:
1 – капля жидкости; 2 – пленка ПЭ; 3 – предметный столик; 4– станина;
5– микроскоп DM; 6– регулировочные винты; 7 – окуляр

Экспериментальная часть. При анализе результатов исследований было выявлено, что при воздействии плазмы скользящей дуги протекает ряд физико-химических процессов, которые в значительной степени изменяют структуру пленок ПЭВД и ПЭНД, уменьшая значения θ , тем самым улучшая смачиваемость поверхности. Однако при одинаковой толщине пленок значения θ отличаются (табл.1).

Таблица 1

Изменение краевого угла смачивания ПЭ

| № образца | Материал | Краевой угол смачивания по воде, θ | | | |
|-----------|----------|---|-----------------|---|-----------------|
| | | исходный | | модифицированный | |
| | | фото | Значение, град. | фото | Значение, град. |
| 1 | ПЭНД |  | 82±3 |  | 30±3 |
| 2 | ПЭВД |  | 80±3 |  | 25±3 |

Оптимальная продолжительность модификации является 5 с, так как дальнейшая модификация изменяет θ в диапазоне 1-20. При модификации ПЭ пленок в плазме скользящей дуги значения θ находятся в пределах $29\pm 3^\circ$, в отличие от модификаций тлеющей и коронной дуги, где значения θ лежат в диапазоне 40 ± 5 . Основываясь на приведенной модификации можно предположить, что вблизи электродов образуются вещества на основе азота, обладающие высокой реакционной способностью к поверхности пленки. Исходя из полученных данных следует отметить, что скорость плазменного травления зависит от вида газа, а также от свойств и структуры пленок, так ПЭНД имеет более высокую степень кристалличности и плотности чем ПЭВД, из-за этого краевой угол после модификации различается на 6° . Модификация ПЭ посредством низкотемпературной плазмы скользящей дуги является наиболее перспективным

направлением, так как в сравнении с другими способами модификации отличается меньшей трудоемкостью и ресурсозатратностью.

Заключение. В ходе работы был проведен научный анализ, в котором были рассмотрены различные методы модификации поверхности ПЭ, а также основные проблемы низкой адгезии и методы ее решения. Химическая модификация приводит к улучшению смачиваемости поверхности ПЭ, а также улучшает адгезионные свойства, однако снижает прочностные свойства пленки, вызванной глубиной модификации, кроме того использование токсичных реагентов представляет опасность для персонала и оборудования. Плазменная модификация увеличивает применение ПЭ в качестве ПКМ, так как она лишена выше описанных недостатков и позволяет сохранить физические, оптические и механические свойства материала без использования реагентов, что является наиболее экологически безопасным методом.

Экспериментально доказано что модификация в плазме скользящей дуги является эффективным способом улучшения адгезионных свойств пленок низкого и высокого давления, при уменьшении краевого угла смачивания для ПЭНД от $82\pm 3^\circ$ до $30\pm 3^\circ$, а для ПЭВД от $80\pm 3^\circ$ до $25\pm 3^\circ$.

Список литературы

1. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т. 4: Полимерные-Трипсин / Редкол.: Зефирова Н. С. (гл. ред.) и др. М.: Большая Российская энцикл., 1995. 639 с.
2. Стородубцева Т. Н. Улучшение адгезии в системе полиэтилентерефталат-древесина / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5, № 4(20). С. 169-177.
3. Патент 2694765 Российская Федерация, МПК C09J 5/02 (2006.01) Способ получения активированной поверхности полиэтилена 2018131087: заявл. 28.08.2018: опубл. 16.07.2019 Шайдурова Г.И, Васильев И.Л, Зубарев С.А, Гаврилович В.И.; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество Научно-производственное объединение «Искра», бс.

4. Кейгл Ч. Клеевые соединения. М.: Мир, 1971. 124 с

5. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И., Титов В.А. Плазменное модифицирование текстильных материалов перспективы и проблемы. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002. Т. XLVI, № 1.

6. Пискарев М.С., Батуашвили М.Р., Яблоков М.Ю., Кечекьян А.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. Модифицирование поверхности пленок полифторолефинов в тлеющем разряде постоянного тока. ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, 2012. Т. 55, вып. 4.

7. Юленец Ю.П., Трифонов С.А., Стрекалова В.В., Марков А.В., Бузыкина О.Н. Модифицирование поверхности и устойчивость поверхностных свойств полимеров при воздействии плазмы высокочастотного разряда. Известия СПбГТИ (ТУ). 2010. №9.

8. Ефремова А.А., Гарипова Л.Р., Григорьев А.Ю., Храмов Д.Д. Влияние коронной обработки на поверхностные свойства многослойных термоусадочных пленок. Вестник технологического университета, 2015. Т. 18, №7.

References

1. Chemical Encyclopedia: In 5 vols.: vol. 4: Polymer-Trypsin / Editorial Board: Zefirov N.S. (Chief Editor), etc. M.: Bolshaya Rossiyskaya en cikl., 1995. 639p.

2. Storodubtseva T.N. Improvement of adhesion in the polyethylene terephthalate-wood system / T.N. Storodubtseva, A.A. Aksomitny // Forestry Journal. 2015. Vol. 5, No. 4(20). P. 169-177.

3. Patent 2694765 Russian Federation, IPC C09J 5/02 (2006.01) Method for obtaining activated polyethylene surface 2018131087: application 28.08.2018: publ. 16.07.2019 Shaidurova G.I., Vasiliev I.L, Zubarev S.A., Gavrilovich V.I.; applicant and patent holder Public Joint Stock Company Scientific and Production Association «Iskra». 6p.

4. Cagle Ch. Adhesive joints. M.: Mir, 1971. 124 p.

5. Kutepov A.M., Zakharov A.G., Maksimov A.I., Titov V.A. Plasma modification of textile materials prospects and problems. Ros. chem. zh. (Zh. Ros. chem. D.I. Mendeleev University), 2002. Vol. XLVI, No. 1.

6. Piskarev M.S., Batuashvili M.R., Yablokov M.Y., Kechekyan A.S., Gilman A.B., Kuznetsov A.A. Modification of the surface of polyfluorolefin films in a DC glow discharge. CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY, 2012. V. 55. is.4.

7. Yulenets Yu.P., Trifonov S.A., Strekalova V.V., Markov A.V., Buzykina O.N. Surface modification and stability of surface properties of polymers under the influence of high-frequency discharge plasma. Izvestiya SPbGTI (TU), 2010 No. 9.

8. Efremova A.A., Garipova L.R., Grigoriev A.Y., Khramov D.D. The effect of corona treatment on the surface properties of multilayer shrink films. Bulletin of the Technological University, 2015. Vol. 18, No. 7.

УДК 678, 625.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТАННОГО ПЛАСТИКА КАК ДОБАВКИ В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЯХ

*А.В. Ерёмин, О.А. Волокитина, Ф.М. Абрамов, Е.В. Корнилов**

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

**Адрес для переписки: Корнилов Евгений Владимирович,*

E-mail: jenua8885@gmail.com

В настоящее время очень остро стоит проблема переработки пластмасс и их последующего использования. Одной из сфер применения вторичного сырья является строительство автомобильных дорог, а именно частичное замещение битумного вяжущего полимерной смесью. В статье приведена информация о переработанном пластике, как добавке в асфальтобетонную смесь, с целью улучшения его эксплуатационно-прочностных показателей, а также технологии его производства.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, переработанный пластик, строительство дорог, технология производства, пластиковая крошка, полимерная смесь, экология производства

THE USE OF RECYCLED PLASTIC AS AN ADDITIVE IN ASPHALT CONCRETE MIXTURES

*A.V. Eremin, O.A. Volokitina, F.M. Abramov, E.V. Kornilov**

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

Currently, the problem of plastics processing and their subsequent use is very acute. One of the areas of application of secondary raw materials is the construction of highways, namely the partial replacement of bitumen binder with a polymer mixture. The article provides information about recycled plastic as an additive to asphalt concrete mix, in order to improve its operational and strength indicators, as well as its production technology.

Keywords: asphalt concrete mix, recycled plastic, road construction, production technology, plastic chips, polymer mix, ecology of production

Введение. Переработанный пластик имеет множество сфер применения. Строительство автомобильных дорог одно из них. Основным компонентом асфальтобетонной смеси является битум, содержание которого варьируется от 10 до 60 %. Частичная замена этого материала переработанным пластиком позволит решить проблему загрязнения окружающей среды и улучшит практические характеристики дорожного покрытия [1].

Методика исследования. Впервые эту технологию запатентовала индийская компания KK Plastic Waste Management Ltd. Компания создала полимерную смесь KK Poly Blend, которая замещает 8 % битума в составе асфальтобетонной смеси и улучшает характеристики дорожного покрытия. Срок эксплуатации дорог, созданных на базе этого материала, увеличен в два раза [1].

Так же очень важен Европейский опыт. Так, шотландская компания Mac Rebur [2] запатентовала высокоэффективные добавки на основе переработанного пластика. Они выпускаются в виде гранул и хлопьев, которые добавляются вместе с битумом при производстве покрытия [1]. Компания создала два вида добавок: MR6 и MR8.

Экспериментальные результаты. MR6 представляет собой сложную композицию полимеров, предназначенных для расширения и улучшения свойств битумного вяжущего для асфальтобетона, используемого на дорожных

покрытиях. Она обеспечивает повышенную жесткость и стойкость асфальтобетонной смеси к деформации (образованию колеи) без ущерба для гибкости (трещиностойкости), (рис. 1). Подходит для всех типов асфальта, который используется во всех слоях дорожного строительства. Идеально подходит для покрытия перекрестков, кольцевых развязок и участков с медленно движущимися тяжелыми транспортными средствами, где устойчивость к деформации имеет решающее значение. Подходит для увеличения жесткости связующих и базовых слоев, чтобы уменьшить требуемую толщину дорожного покрытия.

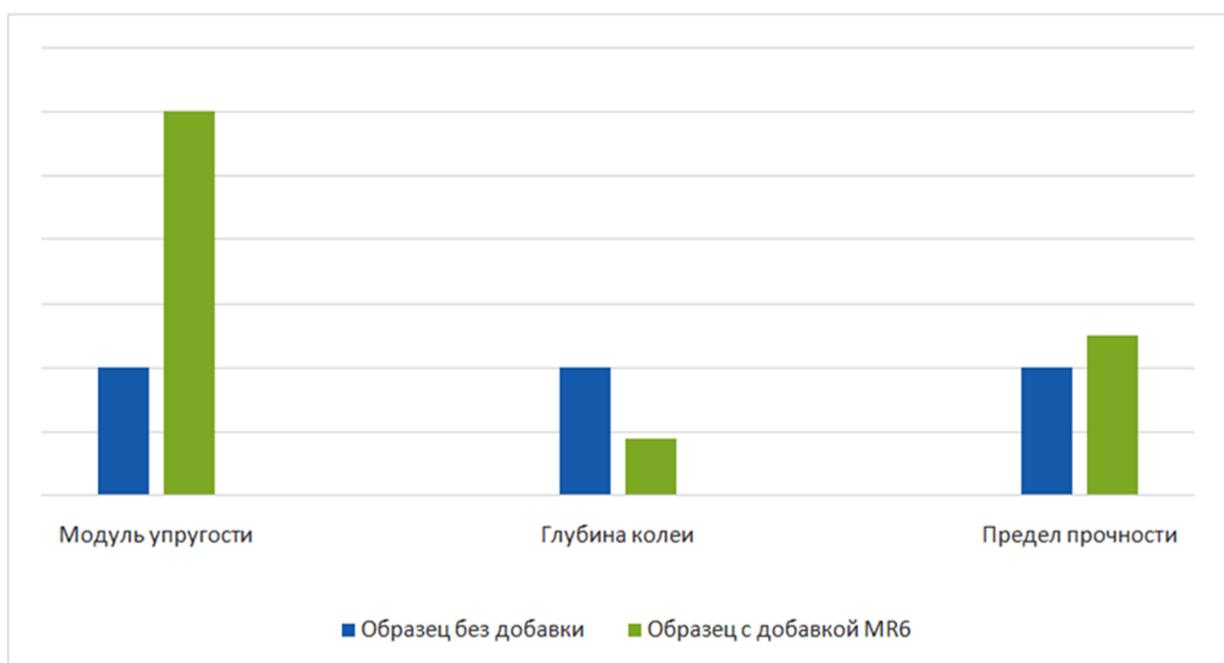


Рис. 1. Сравнение образцов асфальтобетона с добавкой MR6 и без неё

MR8 создан для расширения состава немодифицированного битума, чтобы максимизировать экологические и экономические выгоды без негативного влияния на эксплуатационные характеристики асфальта. Добавка предназначена для всех типов асфальтобетона, который используется в дорожном строительстве, (рис. 2). Идеально подходит для покрытия автомобильных парковок, подъездных путей и местных дорог, где основными факторами являются экологичность и экономичность.

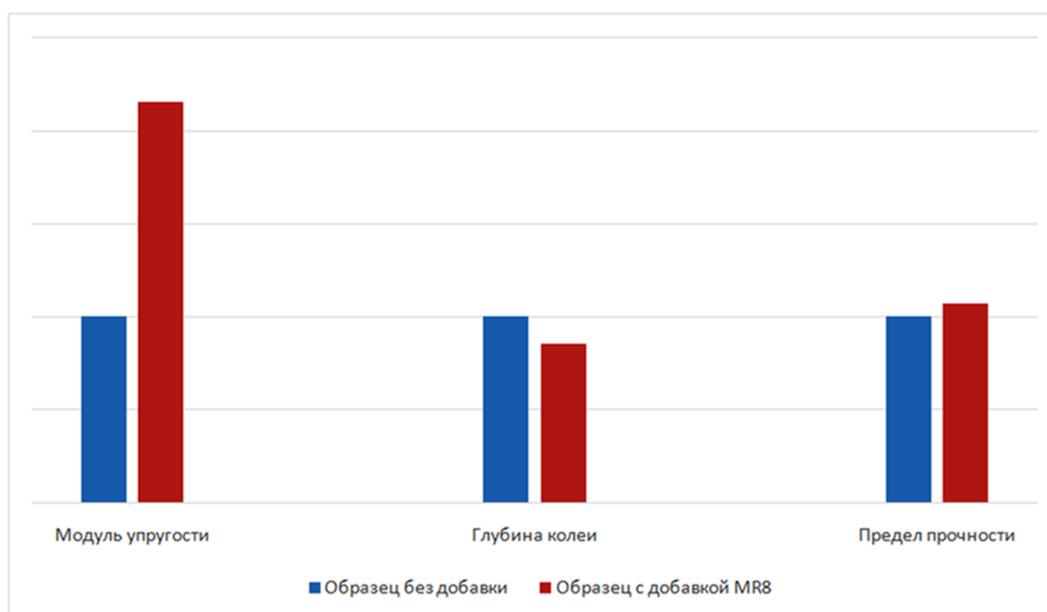


Рис. 2. Сравнение образцов асфальтобетона с добавкой MR8 и без неё

В качестве одного из объектов можно привести автомобильную дорогу в г. Денбишир, (рис. 3). Был уложен асфальтобетон из каменной мастики толщиной 10 мм, содержащий Мас Ребиг MR8 в количестве 6 % от массы связующего. Использование MR8 в качестве частичной замены вяжущего в этом проекте позволило подрядчику оптимизировать объем битума в асфальтобетонной смеси, предоставив заказчику повышенную экологическую устойчивость при одновременном выполнении проекта в соответствии с требуемым стандартом и в требуемые сроки.



Рис. 3. Автомобильная дорога с применением добавки MR6 Денбишир, Уэльс

По технологии производство необходимо весь переработанный пластик превратить в кусочки, размером не более 5 мм. Для этого используют гранулятор. Затем пластиковые гранулы смешиваются с активатором. Смесь пластиковых гранул и активатора поступает к производителю асфальта (рис. 4). Весь пластик, который используется, плавится при температуре ниже 120°C, чтобы он гомогенизировался должным образом, не создавая микропластиков [3].



Рис. 4. Участок автомобильной дороги с применением пластмасс г.Церматт Швейцария

Заключение. Подводя итог, можно сказать о том, что частичная замена битума переработанным пластиком не только позволяет решить проблему загрязнения окружающей среды, но и значительно увеличивает прочностные показатели асфальтобетонной смеси.

Список литературы

1. Решетняк А.И., Гилязитдинов Д.Н., Баяндурова А.А. Анализ зарубежного опыта применения пластиковых отходов в дорожном строительстве // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой химии. Москва: Перо, 2019. С. 114-116.
2. Рядченко М.А., Каменчуков А.В. Эффективное внедрение переработанного пластика в отрасль дорожного строительства // Проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. №3. С. 202-205.

3. Дорога в британское будущее – из мусора // Дзен URL: <https://dzen.ru/> (дата обращения: 02.04.2023).

References

1. Reshetnyak A.I., Gilyazitdinov D.N., Bandurova A.A. Analysis of foreign experience in the use of plastic waste in road construction // Modern state, problems and prospects of development of industrial chemistry. Moscow: Pero, 2019. P. 114-116.

2. Radchenko M.A., Kamenchukov A.V. Effective introduction of recycled plastic into the road construction industry // Problems of development of architectural and construction complex. 2019. No.3. P. 202-205.

3. The road to the British future – from garbage // Zen URL: [https://dzen.ru /](https://dzen.ru/) (accessed: 02.04.2023).

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Волокитина Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Абрамов Фёдор Михайлович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

УДК 678.762.9

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ПОДКИСЛЯЮЩЕГО АГЕНТА
НА ПРОЦЕСС ВЫДЕЛЕНИЯ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО
КАУЧУКА ИЗ ЛАТЕКСА**

И.А. Писарева, Г.Ю. Вострикова, С.С. Никулин*

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

**Адрес для переписки: Вострикова Галина Юрьевна, E-mail: vostr76-08@live.ru*

В работе представлен цикл исследований по изучению влияния расхода серной кислоты на процесс выделения каучука из латекса. В качестве коагулирующего агента использован хлорид натрия. Показано, что со снижением расхода серной кислоты возрастает расход и коагулирующего агента. При этом было установлено, что температура оказывает влияние на выделение каучука из латекса. Наилучшие результаты были получены при выделении каучука из латекса при температуре 1-2°C.

Ключевые слова: латекс, коагулянт, коагуляция, расход серной кислоты

**STUDY OF THE EFFECT OF ACIDIFYING AGENT CONSUMPTION
ON THE PROCESS OF ISOLATION OF STYRENE-BUTADIENE
RUBBER FROM LATEX**

I.A. Pisareva, G.Y. Vostrikova, S.S. Nikulin*

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

**Corresponding author: Vostrikova Galina Yurievna, E-mail: vostr76-08@live.ru*

The paper presents a series of studies to study the effect of sulfuric acid consumption on the process of separating rubber from latex. Sodium chloride was used as a coagulating agent. It is shown that with a decrease in the consumption of sulfuric acid, the consumption of the coagulating agent also increases. At the same time, it was found that temperature affects the release of rubber from latex. The best results were obtained by separating rubber from latex at a temperature of 1-2°C.

Keywords: latex, coagulant, coagulation, sulfuric acid consumption

Введение. В настоящий момент, во всем современном мире, идет поиск по разработке различных полимерных материалов, на основе каучуков, которые бы отвечали всем необходимым требованиям, как для производителя, так и потребителя. В частности, материалы должны быть доступными в цене и обладать улучшенными физико-механическими показателями. В промышленном производстве эмульсионных каучуков до настоящего времени, в некоторых технологиях в качестве коагулирующего агента используют хлорид натрия, который имеет ряд серьезных недостатков, основными из которых являются: расход (до 250 кг/т каучука), загрязнение окружающей среды солевым компонентом и компонентами эмульсионной системы, содержащими в своем составе стойкий к биодegradации – лейканол.

Анализ имеющихся литературных данных показывает, что процесс выделения каучука из латекса проводили при расходе подкисляющего агента (серной кислоты) 12-15 кг/т каучука. Однако, оценке влияния расхода подкисляющего агента на процесс выделения каучука из латекса должного внимания уделено не было. Отмечено, что за последнее десятилетие, в технологическом процессе производства эмульсионных каучуков произошли изменения [1-2].

В настоящей работе изучено влияние расхода серной кислоты на процесс выделения бутадиен-стирольного каучука из латекса коагулирующим агентом хлоридом натрия. Следует отметить, что это имеет важное практическое применение.

Методики получения и исследования образцов. В исследовательской работе для получения каучука СКС-30 АРК использовался бутадиен-стирольный латекс, отобранный с действующего промышленного предприятия и обладающего следующими показателями (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики бутадиен-стирольного латекса

| Наименование показателей | Значение |
|--|----------|
| Сухой остаток, %мас. | 21,8 |
| Поверхностное натяжение, $[\sigma]$, мН/м | 58,6 |
| pH латекса | 9,6 |
| Содержание связанного стирола, %мас. | 22,5 |

Коагуляцию каучукового латекса СКС-30 АРК проводили согласно общепринятой методике [3] с использованием в качестве коагулирующего агента водный раствор соли хлорида натрия с концентрацией 20,0 %, а в качестве подкисляющего агента – 2,0 % водный раствор серной кислоты. Выделение каучука из латекса проводили при температурах 1-2°, 20° и 60°C и осуществляли на коагуляционной установке, представляющей собой ёмкость, снабжённую перемешивающим устройством и помещённую в термостат для поддержания заданной температуры. Полноту коагуляции оценивали визуально по прозрачности серума и гравиметрически – по массе получаемой крошки каучука. Образующуюся крошку отделяли от серума, промывали тёплой водой и после частичного обезвоживания досушивали в сушильном шкафу при температуре 82-85°C.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Экспериментальные результаты, представленные в табл. 2 показали, что на процесс выделения каучука из латекса оказывали влияния расход хлорида натрия, температура процесса и расход серной кислоты (подкисляющий агент).

Таблица 2

Выделение каучука из латекса СКС-30 АРК хлоридом натрия

| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|------|------|------|------|---|---|---|
| | 1-2 | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 25 | 50 | 80 | 100 | - | - | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | - | - | - |
| Выход коагулюма, % | 78,2 | 87,6 | 90,2 | 93,8 | 95,2 | - | - | - |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кп | кп | - | - | - |

Продолжение таблицы 2

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 20 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 120 | 150 | 175 |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Выход коагулюма, % | 52,7 | 74,1 | 80,5 | 85,1 | 88,6 | 93,6 | 94,0 | 94,5 |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кп | кп | кп |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 60 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 170 |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Выход коагулюма, % | 51,4 | 72,3 | 76,8 | 79,5 | 85,6 | 88,7 | 89,7 | 92,4 |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кп |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 1-2 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 120 | 140 | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | - |
| Выход коагулюма, % | 75,4 | 79,3 | 82,1 | 84,8 | 87,9 | 94,0 | 95,1 | - |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кп | кп | - |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 20 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | - |
| Выход коагулюма, % | 72,2 | 78,5 | 81,8 | 83,3 | 86,1 | 89,2 | 93,1 | |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кп | |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 60 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 50 | 100 | 150 | 175 | 200 | - | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | - | - |
| Выход коагулюма, % | 59,5 | 67,0 | 81,6 | 87,7 | 90,4 | 93,6 | - | - |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кп | - | - |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 1-2 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 50 | 100 | 120 | 160 | - | - | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | - | - |
| Выход коагулюма, % | 47,3 | 63,6 | 80,2 | 87,3 | 92,4 | - | - | - |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кп | кнп | кп | - | - | - |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 20 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | - | - |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | - |
| Выход коагулюма, % | 47,3 | 60,5 | 88,6 | 86,4 | 84,5 | 85,5 | - | - |
| Оценка полноты коагуляции | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп | - | - |
| Вид коагулянта | Хлорид натрия | | | | | | | |
| Температура коагуляции, °С | 20 | | | | | | | |
| Расход хлорида натрия, кг/т каучука | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Расход серной кислоты, кг/т каучука | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Выход коагулюма, % | | | | | | | | |
| Оценка полноты коагуляции | | | | | | | | |

Установлено, что самые низкие расходы коагулирующего агента достигались при низкотемпературном процессе выделения каучука из латекса (1-2°С).

Полноту выделения каучука из латекса в данном случае достигали при расходе хлорида натрия 80 кг/т каучука и расходе серной кислоты 15 кг/т каучука. Повышение температуры коагуляционного процесса до 20°C приводило к возрастанию расхода хлорида натрия до 120 кг/т каучука. Дальнейшее увеличение температуры до 60°C (температурный режим соответствующий промышленному) повышало расход хлорида натрия до 170 кг/т каучука.

Снижение расхода подкисляющего агента до 10 кг/т каучука приводило к повышению расходов хлорида натрия до 140 кг/т каучука (температура 1-2°C), что больше, чем при расходе серной кислоты 15 кг/т каучука. Дальнейшее поднятие температуры коагуляционного процесса до 20°C приводило к возрастанию расхода хлорида натрия до 150 кг/т каучука, а при 60°C – до 200 кг/т каучука.

Дальнейшее сокращение расхода серной кислоты до 5 кг/т каучука приводило к подъему расхода хлорида натрия до 160 кг/т каучука (температура 1-2 °C). Это оказался единственный температурный режим позволивший достичь полного выделения каучука из латекса. Дальнейший подъем температуры до 20 °C и возрастание расхода хлорида натрия до 300 кг/т каучука не позволили достичь полной коагуляции бутадиен-стирольного латекса. Проведение процесса выделения каучука из латекса при 60°C было нецелесообразно.

Достичь полноты выделения каучука из латекса при расходе серной кислоты 5 кг/т каучука оказалось возможным при разбавлении коагулируемой системы водой в соотношении латекс: вода = 1:1,0 - 1,5. Расход хлорида натрия в данных условиях снижался до 150 кг/т каучука.

Завершающим этапом исследований явилось рассмотрение возможности проведения процесса выделения каучука из латекса хлоридом натрия без применения подкисляющего агента.

Установлено, что при расходе хлорида натрия 100 кг/т каучука выход крошки каучука не превышал 3 %. При увеличении расхода коагулянта до 200 кг/т каучука коагуляция была неполной и не превышала 10 %. Разбавление

коагулируемой системы водой (латекс: вода 1:1,0 - 1,5 %) приводило к образованию мелкодисперсной крошки каучука. Полноту коагуляции достигали при расходе хлорида натрия 300 кг/т каучука и разбавлении водой коагулируемой системы.

Заключение. Проведенным циклом исследований было установлено, что снижение расхода серной кислоты приводило не только к падению общего выхода крошки каучука, но и изменению её фракционного состава. Возрастала доля мелкодисперсной крошки каучука в водной фазе (серуме). Это приводит к потере каучука со сточными и промывными водами, снижению производительности процесса и загрязнению окружающей среды.

Список литературы

1. Папков В.Н., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-стирольные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж: ВГУИТ, 2015. 315 с.
2. Распопов И.В., Никулин С.С., Гаршин А.П. и др. Совершенствование оборудования и технологии выделения бутадиен-(альфа-метил) стирольных каучуков из латексов. М.: ЦНИИТ Энефтехим, 1997. 68 с.
3. Пояркова Т.Н., Никулин С.С., Пугачева И.Н., Кудрина Г.В., Филимонова О.Н. Практикум по коллоидной химии латексов. М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2011. 124 с.

References

1. Papkov V.N., Rivin Je.M., Blinov E.V. Butadien-stirol'nyekauchuki. Sintezisvoystva. Voronezh: VGUIT, 2015. 315 p.
2. Raspopov I.V., Nikulin S.S., Garshin A.P. i dr. Sovershenstvovanie oborudovaniya i tehnologii vydeleniya butadien-(al'fa-metil) stirol'nyh kauchukov iz lateksov. M.: CNIIT Jeneftehim, 1997. 68p.

3. Pojarkova T.N., Nikulin S.S., Pugacheva I.N., Kudrina G.V., Filimonova O.N. Praktikum po kolloidnoj himii lateksov. M.: Izdatel'skij Dom «Akademija Estestvoznaniija», 2011. 124p.

Писарева Ирина Александровна – студент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий

Вострикова Галина Юрьевна – канд. хим. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Никулин Сергей Саввович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий

УДК 691.535

**МИКРО- И НАНОКАПСУЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ДОБАВОК
ДЛЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

*О.В. Артамонова, А.Б. Закатов**

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

**Адрес для переписки: Закатов Артем Борисович,*

E-mail: zakatovartem@yandex.ru

В настоящее время к перспективным методам модифицирования структуры цементных композитов с эффектом самовосстановления можно отнести применение микро- и нанокapsулированных добавок. В данной статье рассмотрены основные методы получения микро- и нанокapsул, а также наиболее распространенные активные добавки и оболочки капсул. Отмечены преимущества и недостатки капсул с жидким ядром и полимерной оболочкой, с использованием твердых материалов (порошки природного и синтетического происхождения). Представлены примеры применения микрокапсулирования для получения цементных материалов с эффектом самовосстановления.

Ключевые слова: микрокапсулирование, активные добавки, самовосстанавливающиеся материалы, цементные композиты

**MICRO- AND NANOENCAPSULATION OF ACTIVE ADDITIVES
FOR SELF-HEALING CEMENT COMPOSITES**

*O.V. Artamonova, A.B. Zakatov**

**Correspondence address: Zakatov Artem Borisovich,*

E-mail: zakatovartem@yandex.ru

At present, the use of micro- and nanoencapsulated additives can be attributed to promising methods for modifying the structure of cement composites with the effect of self-healing. In this article the main methods of micro- and nano-encapsulated composites as well as the most common active additives and encapsulation shells are discussed. The advantages and disadvantages of capsules with a liquid core and polymer shell, using solid materials (powders of natural and synthetic origin) are highlighted. Examples of microencapsulation application for obtaining cement materials with self-repair effect are presented.

Keywords: microencapsulation, active additives, self-healing materials, cement composites

Введение. Микро- и нанокапсулирование – это процесс полной или частичной изоляции функционального соединения (активной добавки) в оболочку материала, выполняющего роль капсулы. При этом возможно формирование микро- и нанокапсул двух типов: закрытые и открытые. Закрытые капсулы характеризуются жидким или твердым ядром, окруженным полимерной оболочкой. Для открытых капсул характерно наличие твердого ядра, состоящего из частиц с развитой поверхностью и высокой пористостью, которое обработано функциональным соединением (активной добавкой). В зависимости от метода капсулирования изменяется размер капсул от 1 – 5 нм до 100 – 300 мкм. Стоит отметить, что наноразмерные капсулы получают, используя методы аэрозольного распыления, полимеризации и золь-гель процесса [1]. Микрокапсулы размером от 100 нм до 20 мкм получают электростатической коагуляцией. При увеличении размеров до 500 мкм используют распылительную сушку эмульсионной гетерогенной дисперсной системы. Более крупные микрокапсулы размером от 1 мкм до 1 - 10 мм формируют методами коацервации или полимериза-

ции в различных гетерогенных дисперсных системах (например, эмульсиях или суспензиях) [2 – 5].

Сегодня в промышленных масштабах выпускают микрокапсулы закрытого типа, как правило с жидким ядром. Однако, в качестве ядра в микро-и нанокапсулах можно использовать жидкие, твердые или газообразные функциональные соединения. При этом инкапсулирование твердых веществ более предпочтительно, в случае получения микро- и нанокапсул для модификации цементного камня, т. к. это повышает его механическую прочность. Стоит отметить, что при этом происходит выход активной добавки из микрокапсулы постепенно, а не мгновенно, как в случае разрушения микро- и нанокапсул с жидким ядром. Метод и условия (температура процесса, степень дисперсности, вязкость дисперсионной среды, наличие в системе поверхностно-активных веществ) синтеза влияют на количество и агрегатное состояние функционального вещества, которое используется в качестве ядра микро-и нанокапсул. При этом массовым соотношением между материалом оболочки и инкапсулированным веществом обычно подбирается в диапазоне 15 – 49% по массе [6].

Методы синтеза микро- и нанокапсул

Все методы синтеза микро- и нанокапсул можно разделить на химические и физико-химические.

Химические методы связаны с протеканием реакций полимеризации или поликонденсации, в результате которых формируется новая фаза за счет сшивания высокомолекулярных соединений полифункциональными агентами на поверхности инкапсулированных частиц (размер микрокапсул составляет 1 – 100 мкм). Для получения твердого ядра микрокапсулы, инициатор полимеризации предварительно прививается на поверхность твердого функционального соединения. При синтезе микро-и нанокапсул с жидким ядром в процессе поликонденсации один из мономеров растворяют в жидкой фазе инкапсулируемого соединения. При этом для снижения проницаемости мембран состав исходных мономеров вводят дополнительно различные сшивающие агенты [7].

К физико-химическим методам относятся коацервация, образование новой фазы при определенной температуре, осаждение без растворителя, испарение летучего растворителя, застывание расплавов в жидких средах, распылительную сушку, физическую адсорбцию [8]. Суть этих методов заключается в фазовом разделении жидкость-жидкость, которое происходит при выделении фазы, обогащенной функциональным соединением, от раствора пленкообразующего вещества. Стоит отметить, что разделение фаз проводится в средах, где в качестве растворителя используется вода или органическое вещество. Процесс выделения фазы всегда сопровождается изменением температуры, pH раствора, испарением растворителя. Микрокапсулы, получаемые физико-химическими методами, характеризуются размерами от 100 мкм до нескольких мм.

В качестве примера рассмотрим два наиболее распространенных метода. Первым в этой группе является метод распределительной сушки. В специальной камере под действием потока нагретого газа-носителя происходит распыление дисперсии активного инкапсулированного соединения в растворе пленкообразующего материала. При этом образуются мелкие капли двухфазного вещества, которые за счет удаления растворителя и отверждения оболочек микрокапсул превращаются в твердые сферические объекты.

Вторым является метод коацервации, его применяют для синтеза микро- и нанокапсул (рис. 1) с жидким или твердым ядром, причем в качестве функционального инкапсулируемого соединения ядра берут неполярную жидкость или твердое вещество с низкоэнергетической поверхностью [9]. Процесс коацервации в растворах высокомолекулярных соединений (ВМС) генерируется изменением температуры, pH или введением активных низкомолекулярных веществ. Водорастворимые ВМС в данном случае применяют для получения оболочек микро- и нанокапсул. Установлено [9], что водорастворимые ВМС диссоциируют в водном растворе на ионы, с формированием жидкой фазы, обогащенной активным веществом, которое выступает в качестве оболочки будущих капсул.

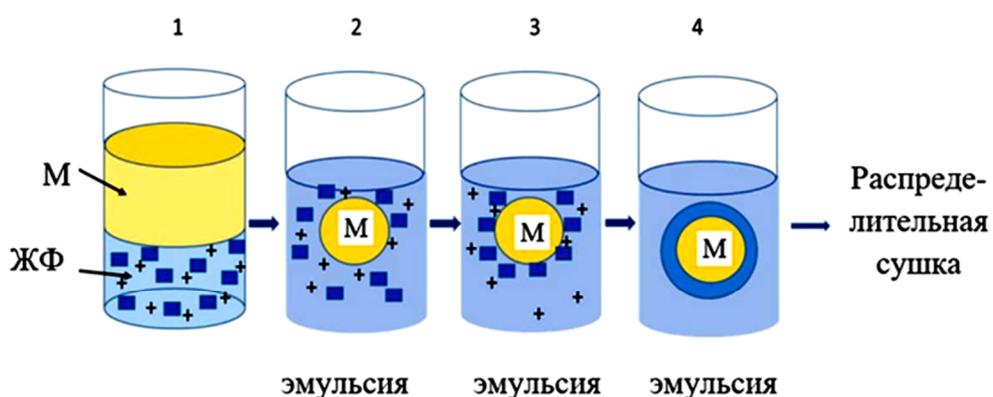


Рис. 1. Обобщенная схема синтеза микро- и нанокapsул методом коацервации. Обозначено: М – масло, ЖФ – жидкая фаза, + - антикоагулянт,  - аминокластовые олигомеры

Безусловно, использование конкретного физико-химического метода синтеза микро- и нанокapsул зависит от параметров и свойств конечного продукта, стоимости и свойств исходных активных инкапсулированных соединений, а также общей стоимости технологического решения. На рис. 2 представлены основные типы известных на сегодняшний день микрокапсул.



Рис. 2. Структурные особенности различных типов микрокапсул. Активные (функциональные) добавки

В настоящее время в качестве активных (функциональных добавок), наполняющих ядро микро- и нанокапсулы, наиболее часто применяют следующие химические и биологические вещества [10]:

- неорганические добавки, родственные по химическому составу и кристаллохимическому строению к минералам цементного клинкера (микрокремнезем, метакаолин, зола-уноса, природные и синтетические гидросиликаты кальция). Процесс самовосстановления цементного композита с перечисленными добавками при воздействии воды предполагает формирование дополнительного количества гидратных новообразований – гидросиликатов и гидралюминатов кальция, которые будут заполнять полость микротрещины;

- расширяющие неорганические добавки (вещества на основе сульфоалюминатов кальция или оксидов CaO и MgO) при взаимодействии с водой образующие кристаллы этtringита или гидроксидов Ca(OH)₂ и Mg(OH)₂, которые заполняют образующуюся микротрещину в цементном композите;

- органические добавки – поликристаллические полимеры с эффектом памяти формы. Они имеют predetermined форму и при появлении микротрещин в цементном композите активируются путем нагревания. В результате внешнего воздействия срабатывает эффект памяти формы и полимер заполняет микротрещину;

- биологические – бактерии, которые посредством своей метаболической деятельности формируют образование карбоната кальция.

Виды оболочек микро- и нанокапсул

Полимерные оболочки микро- и нанокапсул. В качестве оболочки используются синтетические (полисилоксан, поливиниловый спирт, эпоксидные смолы, поливинилхлорид, поливинилацетат, поликарбонаты, полиуретаны) и природные полимеры (производные целлюлозы), обладающие пленкообразующими свойствами в условиях микро- и нанокапсулирования. Материал оболочки подбирается с учетом метода инкапсуляции, структуры и свойств микро- или нанокапсулы, типом «выхода» функционального инкапсулированного соединения.

Неорганические оболочки микро- и нанокапсул. В качестве оболочек открытых микрокапсул могут использоваться природные минералы с высокой пористостью своей структуры, например, гидротальциты, цеолиты, различные виды глин. Эти природные минералы в зависимости от подходящего им типа ионного обмена (катионный, анионный) могут быть насыщены различными активными функциональными соединениями.

Неорганические оболочки нанокапсул тубулярного строения. В качестве оболочки нанокапсул используют природные нанотрубки на основе глинистого минерала галлуазита. Галлуазит (эмпирическая формула $Al_2Si_2O_5(OH)_4$), относится к группе алюмосиликатов с химическим составом: кислород (55,78 %), кремний (21,76 %), алюминий (20,90 %), водород (1,56%) [11]. Нанотрубки галлуазита состоят из скрученных алюмосиликатных пластин, которые характеризуются различным химическим составом внутренней (положительно заряженный ион Al_3^+) и внешней (отрицательно заряженный ион $[SiO_3]_2^-$) поверхности слоя. При этом, есть возможность увеличения внутреннего объема нанотрубки галлуазита без изменения внешнего диаметра, что можно эффективно использовать при размещении активных функциональных соединений внутри нанотрубки. Кроме того, уникальные свойства поверхности галлуазитовых нанотрубок позволяют избирательно модифицировать их внутреннее и внешнее пространство за счет формирования новых ковалентных связей с катионами алюминия или анионами кремний-кислородных мотивов [12]. Для нанокапсулирования активного функционального соединения внутри трубки, её концы можно изолировать с помощью реакции комплексообразования меди (II).

Заключение. В работе кратко рассмотрены основы микро- и нанокапсулирования активных веществ, которое является перспективным и динамично развивающимся методом с начала 2000-х годов. Создание цементных композитов с эффектом самовосстановления находится на начальной стадии развития. Однако, современные строительные технологии уже сегодня помогли повысить долговечность и стойкость материалов специального назначения. Очевидно, что с развитием и удешевлением технологий создания самовосстанавливаю-

щихся материалов они будут внедряться в производство строительных материалов с целью улучшения их свойств и продления сроков эксплуатации изготавливаемых на их основе конструкций.

Список литературы

1. Golovin V.A., Tyurina S.A. Microencapsulation of corrosion inhibitors and active additives for anticorrosive protective polymer coatings //International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2019.V. 8(2). P. 179-198.

2. Brown N., Kessler M.R., Sottos N.R. and White S.R. In situ poly (urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene // Journal of Microencapsulation. 2003. V. 20(6). P. 719-730.

3. Mallakpour S., Dinari M. Fabrication of polyimide / titania nanocomposites containing benzimidazole side groups via sol - gel process // Progress in Organic Coatings. 2012. V. 75. P. 373-378.

4. Dörfler H.D. Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme (Interfaces and Colloidal Disperse Systems) //Springer-Verlag Berlin-Heidleberg. 2002. 990p. (in German).

5. Xiao D.S., Rong M.Z., Zhang M.Q. A novel method for preparing epoxy-containing microcapsules via UV irradiation-induced interfacial copolymerization in emulsions // Polymer.2007. V. 48. P. 4765-4776.

6. Головин В.А., Ильин А.Б., Кузнец В.Т., Вартапетян А.Р. Способ защиты от коррозии металлических поверхностей ингибированными полимерными композициями и микрокапсулы с ингибитором коррозии// Патент 2358036 Российская Федерация. IPC С 23 F 11/00. С 09 D 5/08. публ. 10.06.2009. Бюл. №16.

7. Abdullayev E., Lvov Y. Clay nanotubes for corrosion inhibitor encapsulation release control with end stoppers // Journal of Materials Chemistry.2010. V. 20(32). P. 6681-6687.

8. Preetz C., Hauser A., Hause G., Kramer A., Mäder K. Application of atomic force microscopy and ultrasonic resonator technology on nanoscale: distinction of

nanoemulsions from nanocapsules // *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2010. V. 39(1–3). P. 141-151.

9. Altinbas N., Fehmer C., Terheiden A., Shukla A., Rehage H., Mayer C. Alkylcyanoacrylate nanocapsules prepared from mini-emulsions: A comparison with the conventional approach // *Journal of Microencapsulation*. 2006. V. 23(5). P. 567-581.

10. Артамонова О. В. Современные добавки для самовосстанавливающихся цементных бетонов / Артамонова О.В., Славчева Г.С., Шведова М.А. // *Современные проблемы материаловедения: сборник научных трудов [Электронный ресурс]*. Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2023. С. 30-35.

11. Iqbal Z., Rehg T., Guiheen J., Narasimhan D. Corrosion resistant coated fuel cell plate with graphite protective barrier and method of making the same // *US Patent 6, 864, 007*. 2005.

12. Lvov Yu., Wang W., Zhang L., Fakhrullin R. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds // *Advanced Materials*. 2016. V. 28(6). P. 1227-1250.

References

1. Golovin V.A., Tyurina S.A. Microencapsulation of corrosion inhibitors and active additives for anticorrosive protective polymer coatings // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2019. V. 8(2). P. 179-198.

2. Brown N., Kessler M.R., Sottos N.R. and White S.R. In situ poly (urea–formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene // *Journal of Microencapsulation*. 2003. V. 20(6). P. 719-730.

3. Mallakpour S., Dinari M. Fabrication of polyimide/titania nanocomposites containing benzimidazole side groups via sol - gel process // *Progress in Organic Coatings*. 2012. V. 75. P. 373-378.

4. Dörfler H.D. Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme (Interfaces and Colloidal Disperse Systems) // Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 2002. 990 p. (in German).

5. Xiao D.S., Rong M.Z., Zhang M.Q. A novel method for preparing epoxy-containing microcapsules via UV irradiation-induced interfacial copolymerization in emulsions // *Polymer*. 2007. V. 48. P. 4765-4776.

6. Golovin V.A., Ilyin A.B., Kuznets V.T., Vartapetyan A.R. Sposob zashity ot korrosii metallicheskih poverhnostei ingibirovannyimi polimernymi kompozitsiyami I mikroapsuly s ingibitorom korrosii [Method of protection against corrosion of metal surfaces with inhibited polymer compositions and microcapsules with corrosion inhibitor] // Patent 2358036 Russian Federation. IPC C 23 F 11/00. C 09 D 5/08. publ. 10.06.2009. no. 16 (in Russian).

7. Abdullayev E., Lvov Y. Clay nanotubes for corrosion inhibitor encapsulation release control with end stoppers // *Journal of Materials Chemistry*. 2010. V. 20(32). P. 6681-6687.

8. Preetz C., Hauser A., Hause G., Kramer A., Mäder K. Application of atomic force microscopy and ultrasonic resonator technology on nanoscale: distinction of nanoemulsions from nanocapsules // *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2010. V. 39(1-3). P. 141-151.

9. Altinbas N., Fehmer C., Terheiden A., Shukla A., Rehage H., Mayer C. Alkylcyanoacrylate nanocapsules prepared from mini-emulsions: A comparison with the conventional approach // *Journal of Microencapsulation*. 2006. V. 23(5). P. 567-581.

10. Artamonova O.V., *Sovremennye dobavki dlja samovosstanavlivajushhihsja cementnyh betonov* [Modern additives for self-repairing cement concrete] / Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Shvedova M.A. // *Sovremennye problemy materialovedenija: sbornik nauchnyh trudov* [Modern problems of materials science: collection of scientific works [Electronic resource]]. Lipetsk: Publishing house of Lipetsk State Technical University 2023. P. 30-35. (in Russian).

11. Iqbal Z., Rehg T., Guiheen J., Narasimhan D. Corrosion resistant coated fuel cell plate with graphite protective barrier and method of making the same // US Patent 6, 864, 007. 2005.

12. Lvov Yu., Wang W., Zhang L., Fakhrullin R. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds // Advanced Materials. 2016. V. 28(6). P. 1227-1250.

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

Закатов Артем Борисович – магистрант гр. МУРТ-211 строительного факультета Воронежского государственного университета

УДК 666.97.015

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ
ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО
ТВЕРДЕНИЯ**

С.В. Барковская, Д.С. Воронин*, Г.Г. Рябов

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

* *Адрес для переписки: Воронин Дмитрий Сергеевич, E-mail: winisrush09@mail.ru*

В результате последовательных химических реакций исходных компонентов, получили ряд основных уравнений, позволивших выделить совокупность гидратных новообразований, формирующих и определяющих структуру и свойства шлакощелочных вяжущих, которые были проанализированы с помощью термодинамического метода на изобарно-изотермический потенциал реакции. Расчёт изобарно-термодинамического потенциала вели по методике с применением известных термодинамических констант.

Ключевые слова: шлак, щёлочь, водородный показатель

**STUDY OF MINERAL NEW FORMATIONS OF SLAG-ALKALINE BINDER
HYDROTHERMAL HARDENING**

S.V. Barkovskaya, D.S. Voronin*, G.G. Ryabov

*Tula State University,
Russian Federation, 300012, Tula, pr. Lenina, 92*

**Corresponding author: Voronin Dmitry Sergeevich, E-mail: winisrush09@mail.ru*

As a result of successive chemical reactions of the initial components, a number of basic equations were obtained, which made it possible to isolate a set of hydrate neoplasms that form and determine the structure and properties of slag-alkali binders, which were analyzed using the thermodynamic method for the isobaric-isothermal potential of the reaction. The calculation of the isobaric-thermodynamic potential was carried out according to the method using known thermodynamic constants.

Keywords: slag, alkali, pH value

Введение. Цель настоящего исследования – изучение новообразований в продуктах шлакощелочного вяжущего для получения автоклавного стенового материала и замена извести в производстве силикатного кирпича на основе промышленных отходов химической и металлургической отраслей.

Для оценки возможных минеральных новообразований в системе «шлак+щелочной компонент+вода» использованы термодинамический и объемно-энергетический методы расчета [1-11].

Экспериментальная часть. Анализ проведен применительно к составу доменных шлаков с модулем основности больше единицы ($M > 1$) и щелочных компонентов: гидроксида натрия и карбоната натрия.

В результате последовательных химических реакций исходных компонентов, получили ряд основных уравнений, позволивших выделить совокупность гидратных новообразований, формирующих и определяющих структуру и свойства шлакощелочных вяжущих, которые были проанализированы с помощью термодинамического метода на изобарно-изотермический потенциал реакции. Расчет изобарно-изотермического потенциала вели по методике с применением известных термодинамических констант по уравнению, полученному из уравнения Гибса-Гельмгольца, интегрированием

$$\Delta Z = \Delta H_0 - a\Delta T \ln T - 1/2 b\Delta T^2 - 1/2 c\Delta T^{-1} + y, \quad (1)$$

где ΔH_0 и u – константы интегрирования:

$$\Delta H_0 = \Delta H_{298} - c\Delta T - \frac{1}{2} b\Delta T^2 + c\Delta T, \quad (2)$$

« u » определяется из уравнения 1 при подстановке в него значения $T=298^\circ\text{K}$ и ΔH , рассчитанного по уравнению 2.

После расчета (табл.1) оказалось, что по величине изобарно-изотермического потенциала наиболее вероятными минералами являются окенит, анальцит, вайрацит, натролит, нефелин.

Таблица 1

Термодинамический расчёт реакций минералообразования шлакощелочного вяжущего автоклавного твердения

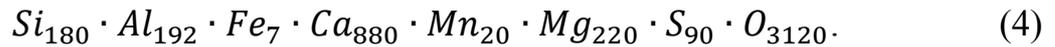
| Исходное уравнение системы шлак + NaOH + H ₂ O | Возможные продукты реакции | ΔH°_{298} | ΔZ ккал/моль | | |
|---|---|------------------------|----------------------|-------|--------|
| | | | 450°K | 478°K | 548°K |
| n(SiO ₂ CaO Al ₂ O ₃) + mNaOH + pH ₂ O | CaO 2SiO ₂ 2H ₂ O + 4NaOH | -29 | -2450 | -5476 | -7,948 |
| | NaAlSi ₂ O ₆ H ₂ O + 3NaOH | -153 | -4245 | -7285 | -10879 |
| | Na ₂ O 6SiO ₂ Al ₂ O ₃ nH ₂ O + 10NaOH | -128 | -7280 | -8432 | -14264 |
| | NaAlSiO ₃ 2H ₂ O+NaOH | -141 | -6258 | -9456 | 11562 |
| | CaAl ₂ Si ₄ O ₁₂ 2H ₂ O+2NaOH | -131 | -1899 | -4052 | -8671 |

При подведении второго этапа расчета были исследованы уравнения химических реакций образования этих минералов методом объемно-энергетического анализа.

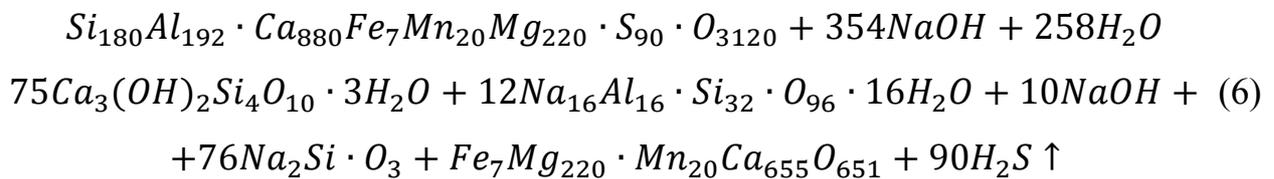
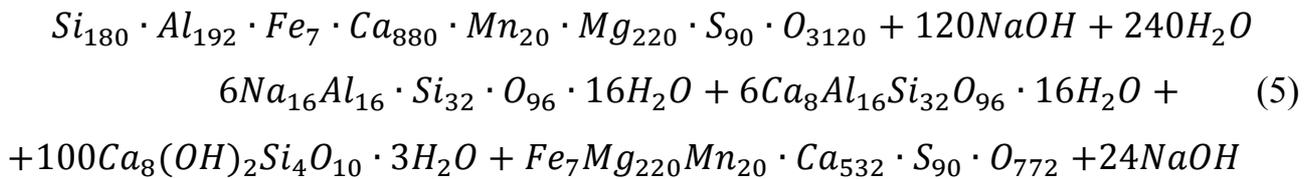
Для этого химический состав шлака пересчитали на количество атомов, содержащихся в объеме 1000 кубических наночастиц. В результате расчета получили следующую формулу:

$$Si_{1.8} \cdot Al_{1.92} \cdot Fe_{0.07} \cdot Ca_{8.8} \cdot Mn_{0.2} \cdot Mg_{2.2} \cdot S_{0.9} \cdot O_{31.2}. \quad (3)$$

Для удобства расчетов содержание атомов увеличиваем в 100 раз, тогда формула примет следующий вид:



Исходя из этого формульного состава, запишем реакции образования термодинамически возможных минералов. При составлении уравнений расчет вели по расходу силиция и алюминия в шлаке.



Уравнения реакций показывают, что если связать весь силиций и алюминий в вайкарит и натролит или в вайкарит, нефелин, и анальцим, то необходимо вводить значительное количество гидроксида натрия.

При дальнейшем увеличении гидроксида натрия в составе шлака образуются высокоосновные натриевые силикаты, которые в дальнейшем за счет вытеснения катионами кальция катионов натрия, переходят в низкоосновные кальциевые силикаты.

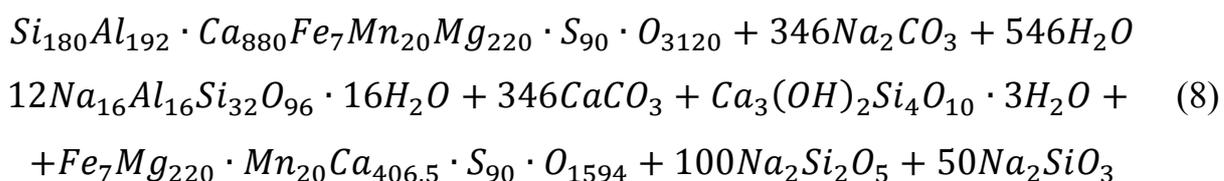
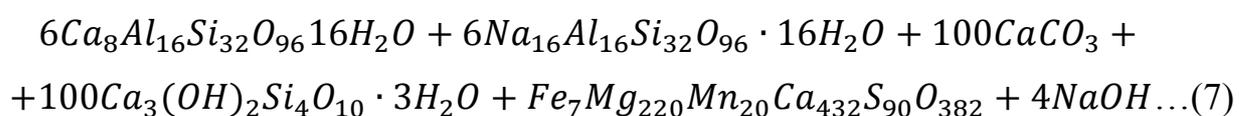
Во всех рассмотренных реакциях весь алюминий полностью связывается в минерал, следовательно, для перевода высокоосновных натриевых силикатов в низкоосновные, в систему необходимо вводить глинистые компоненты.

Термодинамически вероятны обе реакции, а технически наиболее целесообразна реакция (5) как по расходу щелочного компонента, так и по составу минеральных новообразований.

При анализе уравнений реакций по объемно-энергетическому методу установлено, что обе эти реакции идут с увеличением внутренней энергии, то есть энергия паравведенная в автоклав, расходуется на минералообразование.

Увеличение внутренней энергии в продуктах реакции (5) больше, нежели в реакции (6). Следует отметить, что объем конечных веществ в реакции (5) на 2% больше исходных, а в реакции (6) объем конечных продуктов на 6% больше объема исходных.

Исходя из того, что наиболее вероятными термодинамическими реакциями являются реакции с образованием минералов из группы цеолитов, гидросиликатов кальция и натрия, исследуем реакции минералообразования системы «шлак+ $Na_2CO_3 + H_2O$ » с точки зрения возможных парагенезисов.



Из всех термодинамически возможных реакций в данной системе, наиболее возможны процессы минералообразования, представленные уравнениями (7) и (8). На минералообразование в этой системе существенное влияние оказывает соотношение компонентов в исходных составах и прежде всего количество введенного щелочного компонента. Введение карбоната натрия в количестве 100 молекул обуславливает большую вероятность протекания взаимодействия по реакции (7) с образованием низкоосновных натриево-кальциевых алюмосиликатов, а при добавке 346 молекул по уравнению (8) с образованием высокоосновных соединений. В целом минералообразование по обеим реакциям идет с поглощением воды. Ограничивающим условием для образования цеолитов по любой из этих реакций является недостаток глинозема в доменном шлаке. При введении в систему глинозема возможно более интенсивное образование минералов группы цеолитов: анальцима, вайракита и др.

Минералообразование по любому из уравнений (7-8) практически является процессом замещения и обусловлено равенством объемов исходных компонентов и образовавшихся продуктов взаимодействия.

С этой целью нами были подсчитаны соотношения объемов исходных компонентов и продуктов реакции. Подсчет показал, что продукты реакции уравнения (7) на 5% занимают больший объем твердой фазы по сравнению с объемом исходных компонентов реакции. Объем продуктов реакции уравнения (8) на 4% меньше, чем объем исходных компонентов.

При рассмотрении минералообразования в условиях автоклавного твердения необходимо учитывать давление паров. Давление насыщенного пара может ускорять или замедлять процесс взаимодействия шлака и водного раствора карбоната натрия.

Анализируя процесс минералообразования, выражаемого уравнениями (7-8), по известному уравнению Клаузиуса-Клайперона

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Q}{T(V_1 - V_2)}, \quad (9)$$

устанавливаем, что скрытая теплота превращения исходных компонентов объема « V_1 » в продукты реакции объема « V_2 » будет зависеть от температуры (Т) и давления (Р). Увеличение объема (реакция 7) продуктов по сравнению с объемом исходных компонентов требует повышения температуры и давления насыщенного пара ведет к тому, что температура процесса превращения понижается.

Энергетически наиболее выгоден процесс минералообразования по уравнению реакции (7). Расчет этого процесса минералообразования по уравнению Клаузиуса-Клайперона показывает, что приложив избыточное давление к смеси исходных компонентов, можно существенно снизить температуру взаимодействия компонентов системы «доменный шлак+карбонат натрия+вода».

Проведенный термодинамический и объемно-энергетический анализы показали, что при автоклавном твердении шлакощелочного вяжущего возмож-

но образование окенита, минералов группы цеолитов, гидросиликатов кальция, карбонатов.

Изменением содержания щелочного компонента, кремнезема и глинозема можно изменить набор образующихся минералов, т. е. влиять на прочностные свойства и технологические параметры производства.

Заключение. Проведенный термодинамический и объемно-энергетический анализы показали, что при автоклавном твердении шлакощелочного вяжущего возможно образование окенита, минералов группы цеолитов, гидросиликатов кальция, карбонатов.

Изменением содержания щелочного компонента, кремнезема и глинозема можно изменить набор образующихся минералов, т.е. влиять на прочностные свойства и технологические параметры производства.

Список литературы

1. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М.: Стройиздат, 1965. 13с.
2. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М. Термодинамика силикатов. М.: Госстройиздат, 1972. 266с.
3. Ботвинкин О.К. Физическая химия силикатов. М.: Промстройиздат, 1955. 288с.
4. Глуховский В.Д. Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны. Киев: Вища школа, 1979. 231с.
5. Грибенюк В.М., Кошевой Ю.Н. Применение горных пород и минералов в производстве строительных материалов. Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского Университета, 2017. 100с.
6. Карпов В.В. Химическая термодинамика в петрологии и геохимии. Иркутск: АН СССР, 1972. 385с.
7. Козицин Ю.В., Рудник В.А. Руководство к расчетам баланса вещества и внутренней энергии при формировании пород. М.: Изд. «Недра», 1968. 364с.

8. Летников Ф.Н. Изобарные потенциалы образования минералов и применение их в геологии. М.: Изд. «Недра», 1965. 116с.
9. Наумов Г.Б., Рыженков Б.И., Ходоковский И.Д. Справочник термодинамических величин, М., 1971. 239с.
10. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник. Под ред. А.П. Зефирова. М., Атомиздат, 1965. 460с.
11. Термические константы веществ. Под ред. В.П. Галушко. Вып. 1-3. М.: Изд. «Недра», 1965-1968. 265с.

References

1. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosyan O.P. Thermodynamics of silicates. M.: Stroyizdat, 1965. 13p.
2. Babushkin V.I., Matveev G.M. Thermodynamics of silicates. M.: Gostroyizdat, 1972. 266p.
3. Botvinkin O.K. Physical chemistry of silicates. M.: Promstroyizdat, 1955. 288с.
4. Glukhovskiy V.D. Alkaline and alkaline-alkaline earth hydraulic binders and concretes. Kyiv: Vishcha school, 1979. 231p.
5. Gribenyuk V.M., Koshevoy Yu.N. The use of rocks and minerals in the production of building materials. Tutorial. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2017. 100p.
6. Karpov V.V. Chemical thermodynamics in petrology and geochemistry. Irkutsk: Academy of Sciences of the USSR, 1972. 385p.
7. Kozitsin Yu.V., Rudnik V.A. A Guide to Calculating the Balance of Matter and Internal Energy in the Formation of Rocks. M.: Ed. «Nedra», 1968. 364p.
8. Letnikov F.N. Isobaric potentials of mineral formation and their application in geology. M.: Ed. «Nedra», 1965. 116p.
9. Naumov G.B., Ryzhenkov B.I., Khodokovsky I.D. Handbook of thermodynamic quantities. M., 1971. 239p.

10. Thermodynamic properties of inorganic substances. Directory. Ed. A.P. Zefirov. M.: Atomizdat, 1965. 460p.

11. Thermal constants of substances. Ed. V.P. Galushko. Issue. 1-3. M.: Ed. «Nedra», 1965-1968. 265p.

Барковская Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, изделий и конструкций Тульского государственного университета

Воронин Дмитрий Сергеевич – студент группы 320991 кафедры строительных материалов, изделий и конструкций Тульского государственного университета

Рябов Геннадий Гаврилович – д-р техн. наук, профессор кафедры строительных материалов, изделий и конструкций Тульского государственного университета

УДК 691.973

О ВАЖНОСТИ УЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СЫРЬЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В.Н. Моргун¹, Л.В. Моргун^{2}, Б.К. Гебру²*

¹Южный федеральный университет,

Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

²Донской государственный технический университет,

Российская Федерация, 344001, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

**Адрес для переписки: Моргун Владимир Николаевич,*

E-mail: vnmorgun@sfedu.ru

Отражена актуальность научных исследований, направленных на развитие теории и практики ячеистых бетонов. Перечислены причины нарушения структурной устойчивости пенобетонных смесей и сформулирована необходимость количественного учета воды, физически связываемой заполнителем, используемым при их изготовлении. Разработана методика экспериментальной оценки водоудерживающих свойств заполнителей и приведены полученные результаты. Установлено, что плотность пенобетонных смесей и затвердевших бетонов корреляционно зависят от водопотребности заполнителей. Следовательно, количественный учет влаги, физически связываемой заполнителем на этапах изготовления и твердения пенобетонов, позволит приблизиться к научно обоснованному методу достоверного проектирования состава таких материалов.

Ключевые слова: водоудерживающие свойства заполнителей, пенобетон неавтоклавного твердения, плотность, песок, опока

THE IMPORTANCE OF CONSIDERING RAW MATERIALS' ENERGY POTENTIAL IN THE PRODUCTION OF FOAM CONCRETE MIXTURES

V.N. Morgun¹, L.V. Morgun², B.K. Gebru²*

*¹Southern Federal University,
Russian Federation, 344006, Rostov-on-Don, BolshayaSadovaya str., 105/42*

*²Don State Technical University,
Russian Federation, 344001, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1*

**Address for correspondence: Morgun Vladimir Nikolaevich, e-mail:*

vnmorgun@sfnedu.ru

The relevance of scientific research aimed at developing the theory and practice of cellular concrete is reflected. The reasons for the failure in the structural stability of foam concrete mixtures are listed, and the need for quantitative recording of water physically bound by the filler used in their manufacture is formulated. A method used in the experimental evaluation of the water-retaining properties of aggregates has been developed and the results obtained are presented. It is established that the density of foam concrete mixtures and that of hardened concretes correlatively depends on the water demand of aggregates. Consequently, quantitative accounting of moisture physically bound by the filler at the manufacturing and hardening stages of foam concrete will allow us to approach a scientifically sound method of reliable design in the composition of such materials.

Keywords: water-retaining properties of aggregates, foam concrete of non-autoclave hardening, density, sand, siliceous clay (siliceous marl)

Введение. Актуальность снижения материалоемкости в строительстве растет пропорционально численности населения и требует развития теории и практики ячеистых бетонов. К ячеистым относят пено- и газобетоны. Анализ современной практики стройиндустрии показывает, что в настоящее время самое широкое применение находят блоки из автоклавного газосиликата марок D300...600 [1,2]. А если оглянуться на XX век, то из автоклавного газобетона изготавливали не только блоки, но и обширную номенклатуру крупноразмер-

ных изделий [3], преимущественно плит и панелей, изготавливаемых из бетонов D600.

Уровень техногенных выбросов в сочетании с энергетическими кризисами конца XX века [4] обусловили возникновение глобальной проблемы защиты окружающей среды от тепловых выбросов, возникающих в результате бытовой и инженерной деятельности людей. Перечисленные реалии потребовали практического применения в строительстве ячеистых бетонов меньшей плотности.

Как известно, между плотностью и прочностью материалов существуют четкие корреляционные связи. В результате предприятия, изготавливавшие в прошлом веке крупноразмерные строительные конструкции, вынуждены были изменить номенклатуру. Основной причиной указанного перехода стала высокая дефектность крупноразмерных изделий, обусловленная ограниченной трещиностойкостью газобетонов автоклавного твердения [5].

Параллельно с технологией газобетона развивается технология пенобетона неавтоклавного твердения, важный вклад в развитие которой внес выдающийся ученый XX века Игорь Александрович Лобанов [6]. Современная практика показывает востребованность результатов исследований в области технологии пенобетонов [7-11], не смотря на сложность протекающих социально-экономических процессов.

В настоящее время предприятия стройиндустрии РФ выпускают обширную номенклатуру изделий [12] из различных видов пенобетона неавтоклавного твердения:

стенные блоки и плиты плотностью от 200 до 800 кг/м³;

галтели (погонажные изделия, предназначенные для теплоизоляции мест сопряжения оконных и дверных проемов с несущими строительными конструкциями) плотностью от 400 до 600 кг/м³;

перемычки гражданских зданий брусковые и арочные с несущей способностью до 27,5 кН/м;

карнизные изделия;

сборные блоки вентиляционных каналов.

Этот перечень отражает реальную потребность в научном осмыслении процессов, происходящих в пенобетонных смесях, которые относятся к трехфазным дисперсным системам, чутко реагирующим на любые энергетические воздействия в период интенсивного массопереноса компонентов сырья, то есть при изготовлении и отвердевании.

Постановка задачи

Практика показывает, что при изготовлении любой агрегативно устойчивой пенобетонной смеси в её состав необходимо дозировать такое количество воды затворения, которое в разы превышает необходимое для гидратации портландцемента. Следовательно, для обеспечения структурной устойчивости смесей на этапе гомогенизации сырья и в период фазового перехода «из вязкого в упругое» вся вода затворения должна находиться в физически прочно связанном состоянии по отношению к:

- дисперсным частицам вяжущего, которое в эти периоды существования пенобетонной смеси активно диспергирует и химически связывают воду [13,14];

- дисперсным частицам заполнителя, поверхность которого является подложкой для роста кластеров, а затем и гидратных новообразований [15];

- пенным пленкам, удерживающим дисперсную газовую фазу, и способным изменять свои размеры, как в период перемешивания сырья [16], так и в период фазового перехода в связи с закономерным нарушением баланса между ПАВ в жидкости и пенных пленках [17].

Из перечисленного следует, что необходимо искать приемы, понимание физической сути которых позволит при опоре на конкретные свойства сырья проектировать составы пенобетонных смесей. Полагаем, что первым шагом на этом пути может быть количественное установление водопотребности заполнителей в зависимости от их зернового состава, вещественной природы и структурных особенностей дисперсных частиц.

Для проведения исследований, целью которых являлась экспериментальная оценка влияния водопотребности заполнителей на среднюю плотность и агрегативную устойчивость пенобетонных смесей были выбраны:

- мытый и высушенный кварцевый песок фракции мельче 0,315 мм;
- опока Журавского месторождения такой же фракции.

Выбранные виды заполнителей существенно различались по минералогическому составу и структуре. Следовательно, обладали различной величиной энергетического поверхностного потенциала по отношению к воде.

Кварцевый песок состоял из кристаллического SiO_2 , его частицы имели гладкую шарообразную форму. Опoка Журавского месторождения представляет собой лёгкую микропористую осадочную породу, состоящую преимущественно из мельчайших частиц кремнезёма [18].

Минеральный состав опоки включает различные разновидности аморфного и кристаллического кремнезёма в количестве более 66% по массе. 34% приходится на тонкодисперсный кальцит и некоторое количество глинистых гидрослюдистых минералов, прочно связанных с опалом. По данным [18] средняя плотность опок при их добыче в карьерах составляет 1,45-1,5 г/см³, прочность на сжатие находится в интервале от 7 до 11 МПа.

Исходя из приведенных данных можно заключить, что процесс измельчения опок до дисперсности, регламентируемой технологией пенобетонов, можно отнести к энергосберегающему. Поскольку минералогический состав и структурные особенности опоки могут оказать влияние на рецептурно-технологические свойства пенобетонных смесей и, как следствие, индивидуальные свойства затвердевших пенобетонов было принято решение о необходимости количественного контроля её водоудерживающих свойств.

Экспериментальную оценку количества прочно физически связываемой воды осуществляли следующим образом. Высушенный до постоянной массы и охлажденный до температуры $20 \pm 50^\circ\text{C}$ заполнитель в количестве 1500 г высыпали в емкость для приготовления смеси (сферическую чашу или миску объемом не менее 3 л), предварительно протертую влажной тканью. К дисперсному

заполнителю добавляли некоторое фиксированное количество воды и тщательно перемешивали в течение 1 минуты. Объем введенной воды записывали в таблицу.

На протертую влажной тканью стеклянную пластину устанавливали конус его большим диаметром (габариты усеченного конуса: высота 100 мм и диаметры 100 и 120 мм). Увлажненную смесь укладывали в конус с некоторым избытком и уплотняли путем штыкования (10 раз). Избыток смеси срезали шпателем и фиксировали состояние стыка основания конуса со стеклянной пластиной.

Если состояние стыка визуально не отличалось от того, каким оно было до начала испытания, то увлажненную смесь возвращали в емкость и добавляли некоторое количество воды относительно того, которое было введено первоначально. Смесь повторно перемешивали не более 30 с. Объем дополнительно введенной воды записывали в таблицу и повторно осуществляли манипуляции, изложенные выше до тех пор, пока в стыке конуса со стеклянной пластиной не появлялся валик из воды (рис.1).



Рис. 1. Фото результатов экспериментальной оценки водоудерживающих свойств заполнителя

Таблица 1

Форма таблицы наблюдений при оценке водоудерживающих свойств заполнителей

| | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| № п/п | 1 | 2 | 3 | ... | n-1 | n |
| Количество добавленной воды, мл | m1 | m2 | m3 | ... | mn-1 | mn |
| Состояние стыка | Сухой | Сухой | Сухой | Сухой | Сухой | Водный валик |

Расчет водоудерживающих свойств заполнителя (U_3) осуществляли через суммарное отношение объема воды, израсходованной на получение увлажненной смеси за минусом добавки воды, соответствующей «mn» к массе сухого заполнителя:

$$U_3 = \Sigma (m1 + m2 + \dots + mn-1) / 1500$$

Результаты и обсуждение

С целью количественной оценки влияния минералогического состава и структуры дисперсных частиц заполнителя на их способность физически прочно связывать воду затворения в высоко обводненных дисперсных системах был выполнен эксперимент по методике, приведенной выше. Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2

Водоудерживающие свойства заполнителей фракции мельче 0,315 мм, пригодных для изготовления для пенобетона

| Наименование материалов | Водоудерживающие свойства, % по массе | | | | | | | | Средняя |
|-------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-----|-------|----|-------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Песок | 18 | 16,67 | 18 | 17,67 | 18 | 18,67 | - | - | 17,84 |
| Опока | Нет | 80 | 66,67 | 66,67 | Нет | 66,67 | 60 | 67,07 | 67,85 |

Из данных, приведенных в табл. 2 следует, что песок и опока принципиально и существенно различаются по способности физически прочно связывать воду. Следовательно, при назначении рецептуры пенобетонной смеси следует учитывать, установленные различия, которые должны касаться расходов жидкой фазы.

Следующим этапом исследований явилась экспериментальная оценка влияния водоудерживающих свойств заполнителей на свойства бетонных сме-

сей и плотность затвердевшего пенобетона. Для этого были запроектированы и изготовлены фибропенобетоны марки D600 (рис. 2).

В ходе операционного контроля свойств изготовленных фибропенобетонных смесей было установлено, что смеси с традиционным видом заполнителя, песком, обладали средней плотностью 0,843 кг/л, а с опокой - 1,149 кг/л. Оценка пластической прочности показала, что не смотря на существенные различия в средней плотности она одинакова и составляет в течение 5 минут после их приготовления по 108 Па у каждой из них.

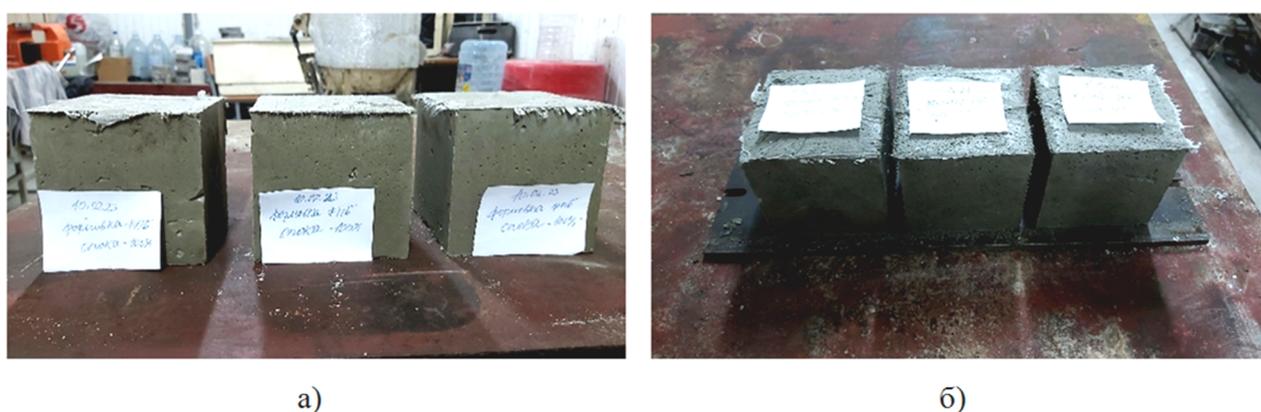


Рис. 2. Фото распалубленных образцов из фибропенобетона:
а) фибропенобетон с заполнителем из опоки, б) фибропенобетон с заполнителем из песка

Образцы были герметично упакованы в полиэтиленовую пленку и твердели в лабораторных условиях при температуре +20°C. Для установления плотности сухого фибропенобетона образцы-кубы были разрезаны на пластины и высушены при температуре +85°C до постоянной массы. Ограничения по температуре сушки связаны с наличием полипропиленовой фибры в структуре межпоровых перегородок пенобетона. Результаты представлены в табл. 3.

Из результатов эксперимента следует, что средняя плотность сухих пенобетонов на основе кварцевого песка и опоки составляет 681 кг/м³ и 792 кг/м³ соответственно. То есть, различается на марку. Если сравнивать потери влаги при сушке, то следует признать, что пенобетоны с заполнителем из опоки потеряли её почти в 2 раза больше, чем образцы, изготовленные на песке. Влаж-

ность по массе у пенобетона на песке ($w_{m,п}$) и опоке ($w_{m,o}$) составила 22,12 % и 42,55% соответственно.

$$w_{m,п} = \frac{842 - 681}{681} = 23,64\%$$

$$w_{m,o} = \frac{1129 - 792}{792} = 42,55\%$$

Таблица 3

Плотность влажного и сухого фибропенобетона на основе кварцевого песка и опоки соответственно

| Марка образца | Размеры, см | Масса, г | | Объем, см ³ | Средняя плотность, кг/м ³ | |
|---------------|------------------|----------|--------|------------------------|--------------------------------------|--------|
| | | влажного | сухого | | влажного | сухого |
| П-1 | 10,14×10,02×1,99 | 169,28 | 136,62 | 202,19 | 837,23 | 675,70 |
| П-2 | 10,01×10,08×1,98 | 171,19 | 138,06 | 199,78 | 856,89 | 691,06 |
| П-3 | 10,11×10,01×1,98 | 166,68 | 135,39 | 200,38 | 831,82 | 675,67 |
| О-1 | 10,13×10,03×1,99 | 229,08 | 161,08 | 202,19 | 1132,99 | 796,68 |
| О-2 | 10,07×9,99×1,94 | 218,89 | 153,35 | 195,16 | 1121,59 | 785,77 |
| О-3 | 10,01×10,01×2,02 | 229,11 | 160,60 | 202,40 | 1131,97 | 793,48 |

Примечание: П-1, П-2 П-3, в таблице указаны для образцов ФПБ на основе песка, а О-1, О-2, О-3 - для образцов на основе опоки.

Кроме того, важно отметить, что разница в показателях плотности сухих бетонов составила 16,3%, в то время как на этапе контроля плотности смесей она достигала 36,3%.

Заключение. Анализ результатов выполненного эксперимента позволяет заключить, что в технологии пенобетонов необходимо учитывать индивидуальные свойства заполнителей по показателям их начальной водопотребности потому, что их энергетический поверхностный потенциал активно влияет на:

- исходную рецептуру смесей;
- свойства смесей на этапе укладки их в формы;
- свойства затвердевших бетонов.

Список литературы

1. Вишнеvский А.А., Гринфельд Г.И., Смирнова А.С. Текущее состояние производства автоклавного газобетона в России /Сб. тр. НПК «Современный автоклавный газобетон». Екатеринбург, 2017. С.10-12.
2. Гринфельд Г.И. Вызовы широкому применению автоклавного газобетона/ Сб. тр. НПК «Современный автоклавный газобетон». Екатеринбург, 2017. С.12-15.
3. Бикбаева К.А. История развития газобетона / К.А. Бикбаева, К.С. Савинкова // Молодой ученый. 2018, № 6 (192). С. 24-25. URL: <https://moluch.ru/archive/192/48309/> (дата обращения: 17.02.2023).
4. Михеев А.А., Шутикова Е.А. Социальные проблемы урбанизации и сити-меджмент на этапе постмодерна / Государственное управление: проблемы и перспективы. №2(35), 2015. С.73-78.
5. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею / Инженерно-строительный журнал, №5, 2013. С.5-19.
6. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов: фибробетонов: диссертация ... доктора технических наук: 05.23.05. Ленинград, 1982. 384 с.
7. Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне / Строительные материалы, 2020 № 3. С. 39-41.
8. Магдеев У.Х., Морозов Ю.В., Пухаренко Ю.В. Трещинообразование дисперсно-армированных бетонов с позиций механики разрушения / Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012, №1. С. 110-117.
9. Талантова К.В., Михеев Н.М. Сталефибробетон и конструкции на его основе. Монография. СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2014. 280 с.

10. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Экспериментальная оценка наноэффектов в технологии пенобетонов / Строительные материалы. 2020, № 7. С. 45-48.
11. Qin Xiaochun. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. P. 536-544.
12. Моргун Л.В., Немилостивый А.Г., Гебру Б.К., Моргун В.Н. Эволюция применения в строительстве легких бетонов // Физика, химия и механика материалов. 2022, №4. С.21-36.
13. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016, №2(62). С. 3-12.
14. Леонович С.Н., Хрусталева Б.М., Яковлев Г.И., Полянских И.С., Карпова Е.А., Лахаин О., Эберхардштейнер Ю., Скрипкинас Г., Пудов И.А. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема // Наука и техника. 2017, №2(16). С.94-103.
15. Перцев В.Т. Управление процессами раннего структурообразования бетонов: монография. Воронеж, 2006. 234 с.
16. Моргун Л.В., Виснап А.В., Моргун В.Н., Черенкова И.А. Возможные типы структур дисперсной газовой фазы при изготовлении пенобетонных смесей // Сб. тр. «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки», Владикавказ, 2015. С.80-82.
17. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. «Либроком», 2013. 480 с.
18. Талпа Б.В., Котляр В.Д. Оценка кремнистых опоковидных пород для производства керамического кирпича // Строительные материалы. 2010, №12. С. 19-22.

References

1. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I., Smirnova A.S. The current state of autoclaved aerated concrete production in Russia/Sb.tr. NPK «Modern autoclaved aerated concrete». Yekaterinburg, 2017. P.10-12.
2. Grinfeld G.I. Challenges to the widespread use of autoclaved aerated concrete/ Sb.tr. NPK «Modern autoclaved aerated concrete». Yekaterinburg, 2017. P.12-15.
3. Bikbaeva K.A. The history of the development of aerated concrete / K.A. Bikbaeva, K.S. Savinkova. // Young scientist, 2018. No. 6 (192). P. 24-25. URL: [https:// moluch.ru / archive/192/48309 /](https://moluch.ru/archive/192/48309/) (accessed: 02/17/2023).
4. Mikheev A.A., Shutikova E.A. Social problems of urbanization and city-management at the postmodern stage/Public administration: problems and prospects. No. 2(35), 2015. P.73-78.
5. Gorshkov A.S., Vatin N.I. Properties of wall structures made of cellular concrete products of autoclave hardening on polyurethane glue/ Civil Engineering Journal, No. 5, 2013. P. 5-19.
6. Lobanov I.A. Fundamentals of technology of dispersed reinforced concrete: fibroconcrete: dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.23.05. Leningrad, 1982. 384 p.
7. Pukharenko Yu.V., Morozov V.I., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Determination of the adhesion strength of reinforcing fibers with a matrix in fiber concrete/Construction Materials, 2020. No. 3. P. 39-41.
8. Magdeev U.H., Morozov Yu.V., Pukharenko Yu.V. Crack formation of dispersed reinforced concrete from the standpoint of fracture mechanics / Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 2012. No. 1. P. 110-117.
9. Talantova K.V., Mikheev N.M. Steel fiber concrete and structures based on it. Monograph. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Railways, 2014. 280 p.

10. Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Experimental evaluation of nanoeffects in foam concrete technology / Building materials, 2020. No. 7. P. 45-48.
11. Qin Xiaochun. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis International Journal of Pavement Research and Technology, 2017. P. 536-544.
12. Morgun L.V., Nemilostivy A.G., Gebru B.K., Morgun V.N. Evolution of application in the construction of light concrete // Physics, chemistry and mechanics of materials, 2022. No. 4. P. 21-36.
13. Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Influence of mechanochemical activation on the features of cement hydration processes // Civil Engineering magazine, 2016. No.2(62). P. 3-12.
14. Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S., Karpova E.A., Lahain O., Eberhardsteiner Yu., Skripkinas G., Pudov I.A. Structural modification of neoplasms in a cement matrix using dispersion of carbon nanotubes and nanosilicon // Science and Technology, 2017. No.2(16). P. 94-103.
15. Pertsev V.T. Control of the processes of early structure formation of concrete: monograph. Voronezh, 2006. 234 p.
16. Morgun L.V., Visnap A.V., Morgun V.N., Cherenkova I.A. Possible types of structures of the dispersed gas phase in the manufacture of foam concrete mixtures // Sb. tr. «Young scientists in solving urgent problems of science». Vladikavkaz, 2015. P.80-82.
17. Blinov L.M. Liquid crystals: Structure and properties. «Librocom», 2013. 480 p.
18. Talpa B.V., Kotlyar V.D. Evaluation of siliceous opokoid rocks for the production of ceramic bricks // Building materials, 2010. No. 12. P. 19-22.

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

Моргун Любовь Васильевна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

Гебру Берхане Куменит – аспирант кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ МАСТИЧНЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Усачев, А.О. Безъязычная, Ю.О. Ерусова*

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

**Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович,*

E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru

Область применения гидроизоляционных материалов достаточно обширна и включает: защиту от действия грунтовых вод котлованов, фундаментов, тоннелей, коллекторов; изоляцию бассейнов, водохранилищ; защиту проезжей части мостов и их опор; защиту междуэтажных перекрытий и санузлов; устройство кровель; заделку и герметизацию стыков между панелями; устройство кровель и др. В данной работе мы рассматривали мастичную гидроизоляцию, представляющую собой жидкие полимерно-битумные составы холодного применения. Мастики обладают высокой степенью защиты, хорошей адгезией, образуют на поверхности сплошную бесшовную мембрану. В статье были изучены основные свойства двух современных гидроизоляционных мастик Clever PU 110 и Clever PU 400 ВТ-2К. Плотность изученных мастик практически одинакова и колеблется от 1,22 до 1,33 г/см³. Водопоглощение незначительно и составляет 3,20...4,00 %. Гибкость мастик на брусе с диаметром закругления 5,0 мм после выдержки в течении 1 ч при температуре минус 25°С характеризуется отсутствием трещин. Теплостойкость, определяемая относительным удлинением стандартного образца после нагрева в течении 1 ч при температуре 100°С, для мастики Clever PU 110 составляет 0,00...0,33 %, для мастики Clever PU 400 ВТ-2К – 1,33 %.

Ключевые слова: гидроизоляционные материалы, мастики, водопоглощение, плотность, теплостойкость, гибкость на брусе

DETERMINATION OF THE BASIC PROPERTIES OF MASTIC WATERPROOFING MATERIALS

Voronezh State Technical University,

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

**Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru*

The field of application of waterproofing materials is quite extensive and includes: protection from the action of groundwater of pits, foundations, tunnels, collectors; insulation of pools, reservoirs; protection of the roadway of bridges and their supports; protection of floor-to-floor floors and bathrooms; roofing; sealing and sealing joints between panels; roofing, etc. In this paper, we considered mastic waterproofing, which is a liquid polymer-bitumen compositions of cold application. Mastics have a high degree of protection, good adhesion, form a continuous seamless membrane on the surface. The main properties of two modern waterproofing mastics Clever PU 110 and Clever PU 400 BT-2K were studied in the article. The density of the studied mastics is almost the same and ranges from 1,22 to 1,33 g/cm³. Water absorption is insignificant and amounts to 3,20...4,00 %. The flexibility of mastics on a beam with a rounded diameter of 5,0 mm after exposure for 1 hour at a temperature of minus 25°C is characterized by the absence of cracks. Heat resistance, determined by the relative elongation of the standard sample after heating for 1 hour at a temperature of 100°C, for Clever PU 110 mastic is 0,00... 0,33 %, for Clever PU 400 BT-2K mastic – 1,33 %.

Keywords: waterproofing materials, mastics, water absorption, density, heat resistance, flexibility on the beam

Введение. В современном строительстве широко применяются гидроизоляционные материалы, которые защищают здания и сооружения от вредного воздействия омывающей или фильтрующей воды и химически агрессивных жидкостей.

Применение гидроизоляционных составов, позволяет решить такие вопросы, как коррозию металлических элементов, протекание кровли, защиту котлованов, тоннелей, коллекторов, размывание фундамента, изоляцию бассейнов

и водохранилищ, образование конденсата и многое другое. Наряду с повышением водонепроницаемости и водостойкость конструкций, улучшаются их и теплофизические свойства.

Современная гидроизоляция может проводиться на любых видах поверхности [1].

Современных гидроизоляционных материалов, представленных на рынке достаточно много. Это материалы на основе битумов и дегтей; на основе битумов и дегтей, модифицированных полимерами; различные мастики; эмульсии, пасты и лаки; материалы на основе полимеров (окрасочные материалы, пленки, листы); герметизирующие материалы (эластичные прокладки, монтажные пены) [2,3].

Основными свойствами гидроизоляционных материалов являются прочность, гибкость, эластичность, химическая стойкость, теплостойкость, водопоглощение и др.

В данной работе мы рассматривали мастичную гидроизоляцию. Мастики представляют собой жидкие полимерно-битумные составы холодного применения, предназначенные для защиты и восстановления гидроизоляционных покрытий поверхностей. Битумные гидроизоляционные мастики – это органические соединения, в состав которых входят высококачественные нефтяные битумы, минеральные наполнители, органические растворители, пластификаторы, наномодификаторы и другие технологические добавки [4].

Современные мастики обладают некоторыми преимуществами перед другими гидроизоляционными материалами. Они обеспечивают высокую степень защиты различных поверхностей от воды, сырости, пара, образуя сплошную водонепроницаемую мембрану без стыков или швов. Несмотря на небольшую толщину, эта поверхностная пленка обладает высокой прочностью, адгезией, а также эластичностью. Свободно выдерживает большой диапазон температур.

Экспериментальная часть. В работе исследовали два вида гидроизоляционной мастики: CleverPU 110 и Clever PU 400 BT-2K.

Clever PU 110 – однокомпонентная полиуретановая мастика. При добавлении колера возможно получение различной цветовой гаммы. Обладает такими свойствами как: устойчивость к УФ и некоторым химикатам, обеспечивает проницаемость водяных паров, легко наносится и ремонтируется, сохраняет свои свойства в диапазоне температур от -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$.

Clever PU 400 ВТ-2К – двухкомпонентная, жидкая битумно-полимерная мастика. Обеспечивает хорошую адгезию к большинству покрытий, обладает эластичностью и высоким показателем растяжения, устойчива к холодной воде и перепадам температур. Сохраняет основные характеристики в диапазоне температур от -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$.

Из данных видов мастик были изготовлены стандартные образцы и проведены испытания с целью определения основных свойств (водопоглощение, гибкость и теплостойкость) [5,6].

Двухкомпонентная мастика Clever PU 400 ВТ-2К готовилась следующим образом. Компоненты битумно-полимерной мастики взвешивались в соотношении 1:1 и тщательно перемешивались в течение 90 с. Получившуюся однородную смесь наносили на основание – стекло, покрытое промасленной бумагой, для лучшего отхождения исследуемого образца от основания. Мاستику наносили в два слоя с перерывом на высыхание (1-2 сут) в количестве 1,0 кг на 1 м^2 (рис. 1).



Рис. 1. Процесс изготовления образцов

Однокомпонентную полиуретановую мастику Clever PU 110 тщательно перемешивали и наносили на основание в количестве 0,6 кг на 1 м² в два слоя с перерывом на высыхание (1-2 сут). При этом изначально к мастике был добавлен серый и красный колер.

После полного высыхания мастик вырезали из них стандартные образцы для проведения испытаний (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид изготовленных образцов

Результаты и их обсуждение. Для определения водопоглощения из каждого вида мастики изготавливались образцы размером 5,0×5,0 см, для испытания на гибкость - 12,0×2,0 см, а для теплостойкости - 10,0×5,0 см.

Результаты данных испытаний представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Результаты определения водопоглощения мастики

| Вид мастики | Плотность готовой мастики, г/см ³ | Водопоглощение в течение 4 сут, % по массе |
|-------------------------|--|--|
| Clever PU 110 (красная) | 1,27 | 3,26 |
| Clever PU 110 (серая) | 1,33 | 4,00 |
| Clever PU 400 ВТ-2К | 1,22 | 3,20 |

Таблица 2

Результаты определения гибкости мастики

| Вид мастики | Гибкость на брус с закруглением радиусом 5,0±0,2 мм после выдержки в течении 1 ч при температуре -25°С |
|-------------------------|--|
| Clever PU 110 (красная) | Трещины отсутствуют |
| Clever PU 110 (серая) | Трещины отсутствуют |
| Clever PU 400 ВТ-2К | Трещины отсутствуют |

Результаты определения теплостойкости мастики

| Вид мастики | Теплостойкость после выдержки в течении 1 ч при температуре 100°C, % |
|-------------------------|--|
| Clever PU 110 (красная) | 0,33 |
| Clever PU 110 (серая) | 0,00 |
| Clever PU 400 ВТ-2К | 1,33 |

Заключение. Плотность изученных мастик в затвердевшем состоянии практически одинакова и колеблется от 1,22 до 1,33 г/см³. Водопоглощение незначительно и составляет 3,20...4,00 %. Гибкость мастик на брусе с диаметром закругления 5,0 мм после выдержки в течении 1 ч при температуре - 25°C характеризуется отсутствием трещин. Теплостойкость, определяемая относительным удлинением стандартного образца после нагрева в течении 1 ч при температуре 100°C, для однокомпонентной мастики Clever PU 110 составляет 0,00...0,33 %, для двухкомпонентной мастики Clever PU 400 ВТ-2К – 1,33 %.

Список литературы

1. Лукинский О.А. Герметизация, гидроизоляция и теплоизоляция в строительстве, ремонте и реставрации зданий и сооружений. Учебное пособие / Лукинский О.А. М.: изд-во Инфра-М, 2017. 662 с.
2. Lin Y., Meziani M.J., Sun Y.P. Innovative materials based // Materials Chemical, 2007. No. 17. P. 1143.
3. Зельманович Я.И. Состояние рынка мягких кровельных и гидроизоляционных материалов в России в 2009-2010 гг. // Строительные материалы, 2011. №3. С. 63-67.
4. Русина С.Ю., Высоцкая М.А. Разработка эффективной наномодифицированной битумно-полимерной мастики / Русина С.Ю., Высоцкая М.А. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. №6. С 87-92.
5. ГОСТ 26589-94. Мастики кровельные и гидроизоляционные. Методы испытаний: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17 марта 1994 г: дата введения 1996-01-01.

6. ГОСТ 30693-2000. Мастики кровельные и гидроизоляционные. Общие технические условия: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 17 мая 2000 г: дата введения 2001-04-01.

References

1. Lukinsky O.A. Sealing, waterproofing and thermal insulation in construction, repair and restoration of buildings and structures. Textbook / Lukinsky O.A. M.: Infra-M publishing house, 2017. 662 p.

2. Lin Y., Meziani M.J., Sun Y.P. Innovativematerialsbased // MaterialsChemical. 2007. No. 17. P. 1143.

3. Zelmanovich Ya.I. The state of the market of soft roofing and waterproofing materials in Russia in 2009-2010. // Building materials, 2011. No.3. P. 63-67.

4. Rusina S.Yu., Vysotskaya M.A. Development of effective nanomodified bitumen-polymer mastic / Rusina S.Yu., Vysotskaya M.A. // Bulletin of V.G. Shukhov BSTU, 2015. No. 6. P. 87-92.

5. GOST 26589-94. Roofing and waterproofing mastics. Test methods: adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization and Technical Standardization in Construction (ISTCS) on March 17, 1994: date of introduction 1996-01-01.

6. GOST 30693-2000. Roofing and waterproofing mastics. General technical conditions: adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Standardization and Certification in Construction (ISTCS) on May 17, 2000: date of introduction 2001-04-01.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Безъязычная Александра Олеговна – студент группы БСМ-211 строительного факультета Воронежского государственного технического университета

Ерусова Юлия Олеговна – студент группы БСМ-211 строительного факультета Воронежского государственного технического университета.

УДК 691.2

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЩЕБНЯ ИЗ ПЕСЧАНИКА И ОЦЕНКА ЕГО КАЧЕСТВА

А.М. Усачев, А.А. Сиденко*

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

**Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович,*

E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru

В статье изучены основные свойства строительного щебня из песчаника. Показаны преимущества и недостатки данного щебня по сравнению с наиболее распространенным гранитным щебнем. Представлены результаты экспериментальных исследований щебня нескольких месторождений, а именно, песчаника Обуховского месторождения Тульской области (серый) и Апанасовского месторождения Ростовской области (рыжий), а также гранитного щебня Павловского месторождения Воронежской области. Определены основные физико-механические свойства всех рассмотренных видов щебня, такие как зерновой состав, содержание зерен пластинчатой и игловой формы, содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц, содержание глины в комках, насыпная плотность, дробимость, истираемость и морозостойкость. Полученные экспериментальные данные показали, что песчаник может быть использован как альтернатива гранитному щебню в качестве крупного заполнителя в бетонных и железобетонных конструкциях, не подверженных многократному замораживанию и оттаиванию.

Ключевые слова: заполнители для бетона, щебень, гранит, песчаник, оценка качества

STUDY OF THE BASIC PROPERTIES OF SANDSTONE RUBBLE AND EVALUATION OF ITS QUALITY

A.M. Usachev, A.A. Sidenko*

Voronezh State Technical University,

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

**Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru*

The article studies the basic properties of sandstone construction rubble. The advantages and disadvantages of this crushed stone in comparison with the most common granite crushed stone are shown. The results of experimental studies of crushed stone from several deposits are presented, namely, sandstone from the Obukhovsky deposit of the Tula region (gray) and the Apanasovsky deposit of the Rostov region (red), as well as granite crushed stone from the Pavlovsky deposit of the Voronezh region. The basic physical and mechanical properties of all the types of crushed stone considered, such as grain composition, grain content of lamellar and needle-shaped grains, the content of pulverized, silty and clay particles, the content of clay in lumps, bulk density, fragility, abrasion and frost resistance, are determined. The experimental data obtained showed that sandstone can be used as an alternative to granite rubble as a large aggregate in concrete and reinforced concrete structures that are not subject to repeated freezing and thawing.

Keywords: aggregates for concrete, crushed stone, granite, sandstone, quality assessment

Введение. Одним из приоритетных направлений развития хозяйства России являются возрастающие объемы строительства дорог, путепроводов, жилья, производственных зданий, торговых и складских помещений и объектов специального назначения. Реализация строительства неизбежно порождает опережающий рост спроса на строительный щебень. Достаточно сказать, что дефицит щебня для строительства только в Центральном Черноземье составляет более 10 млн. кубических метров в год.

Решение этой актуальной проблемы возможно на основе расширения сырьевой базы каменных материалов, пригодных для применения в качестве щебня для строительных работ [1].

В настоящее время в строительных работах чаще всего используют гранитный щебень. Это сыпучий строительный материал в форме фракций диа-

метром от 5 до 70 мм, получаемый посредством дробления крупных кусков магматической породы.

Известных месторождений гранита в нашей стране насчитывается порядка 50, главные из них располагаются в Центральном федеральном округе (Воронежская область), Северо-Западном (республика Карелия, Ленинградская область, Архангельская область), Уральском (Свердловская область).

Гранитный щебень используется практически во всех сферах строительства. Такую популярность он имеет за счет своих высоких прочностных качеств. По прочности марка гранитного щебня варьируется в пределах от 1000 до 1400, у него высокая сопротивляемость к воздействию влаги. Сам гранит имеет незначительную пористость, его средняя плотность составляет 2500...2700 кг/м³.

При этом, гранит – порода с высокой естественной радиоактивностью, так как в составе камня присутствуют естественные примеси, в частности, калий, торий, радий и др. В некоторых карьерах показатель радиоактивности может достигать 265 Бк/кг, при том, что допустимое значение – 370 Бк/кг.

Наряду с большим количеством преимуществ, главным недостатком гранитного щебня, помимо высокой радиоактивности, является его стоимость. В среднем цена за 1 т. достигает 1800-1900 руб.

В природе существует большое разнообразие материалов, которые не уступают по качеству граниту, но при этом имеют более низкую стоимость. Один из таких материалов – песчаник.

Песчаник – обломочная осадочная горная порода, которая представляет собой однородную или слоистую массу песчинок, зацементированных под действием времени. Формирование песчаника происходит в течение нескольких тысячелетий, самый молодой на данный момент пласт песчаника, разрабатываемый для производства щебня, имеет возраст 2 тысячи лет.

Песчаник встречается часто, но не весь материал пригоден для добычи и использования в строительстве, поэтому разрабатываемых месторождений не так уж много. Тем не менее, в нашей стране песчаник добывают в Московской,

Кемеровской, Ростовской, Тульской областях, а также в Поволжье, Дагестане, на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке.

Песчаник образуется на дне рек, озер, морей и океанов. Сначала горные породы разрушаются, превращаются в песок, после чего он постепенно перемешивается с природными цементирующими веществами и под длительным давлением воды спрессовывается, преобразуясь в плотный и высокопрочный материал. Также в некоторых случаях цементация породы происходит и без участия цементирующих веществ: при механическом сжатии на огромной глубине или расплавлении в твёрдом состоянии. Чем дольше песок подвергается воздействию давления, тем более прочным становится этот стройматериал.

Низкое водопоглощение ($V_m = 0,5...4,0 \%$), высокая средняя плотность ($\rho_m = 2400...2700 \text{ кг/м}^3$) и твердость в совокупности с шероховатостью поверхности делают песчаник почти идеальным камнем для применения в качестве заполнителя для бетонов.

К преимуществам песчаника также относятся высокая прочность (1000...1200); экологическая чистота, за счет низких показателей радиоактивности (1 группа); легкость в добыче; низкая стоимость (900 руб./т.).

Свойства данного щебня напрямую зависят от его состава. Так как это полезное ископаемое потрясает разнообразием видов, существует множество его разновидностей.

Наиболее распространен песчаник из кварцевого песка. Реже встречаются породы из полевого шпата, кремния, слюды, глауконита и многих других минералов. Существуют даже породы с содержанием полудрагоценных примесей, таких как турмалин, опал, циркон, апатит, гранат, гематит. Также необходимо учитывать состав цементирующих веществ. Чаще всего встречаются кварцевый, железистый и глинистый цементы. Кварцевый цемент значительно повышает прочность и долговечность песчаника. Песчаник с железистым цементом не обладает достаточной водостойкостью и морозостойкостью, поэтому быстро разрушается. Глинистый цемент – самый прочный и выдерживает резкие температурные перепады.

Помимо приведенных, цементирующими веществами могут также служить глинозём, каолин, опал.

В зависимости от минералов, входящих в состав породы, различают 3 разновидности песчаников:

Мономинеральные – состоят из одного минерала: глаунитовые и кварцевые. Мономинеральные песчаники содержат в своем составе кварц, полевой шпат, слюду и каолинит.

Олигомиктовые – песчаники, состоящие из 2-х минералов.

Полимиктовые – такие породы включают 3 и более минералов. Это граувакковые и аркозовые песчаники [4].

По размеру песчаных частиц в структуре песчаник классифицируют, как описано в табл. 1.

Таблица 1

Классификация структуры песчаника в зависимости от размера песчинок

| Структура песчаника | Размер обломочных зерен, мм |
|---------------------|-----------------------------|
| Грубозернистая | 1 – 2 |
| Крупнозернистая | 0,5 – 1 |
| Среднезернистая | 0,25 – 0,5 |
| Мелкозернистая | 0,1 – 0,25 |
| Тонкозернистая | 0,05 – 0,1 |

Также можно встретить разнозернистый песчаник – результат образования камня из частиц, сильно отличающихся по размеру.

Основными фракциями данного щебня являются:

- 5...20 мм;
- 20...40 мм;
- 40...70 мм.

Наибольшим спросом на рынке пользуется щебень песчаник фракции 5...20 мм, применяющийся в производстве асфальтобетона, бетона и железобетонных конструкций. Щебень песчаник фракций от 20 до 70 мм применяется в строительстве и ремонте дорог, в создании массивных бетонных сооружений, а также используется для дробления на более мелкие фракции щебня.

Экспериментальная часть. Целью данной работы является оценка качества щебня из песчаника различных месторождений и сравнительный анализ с гранитным щебнем. В табл. 2 представлены исследуемые виды щебня и их месторождения.

Таблица 2

| Виды исследуемых щебней | | |
|-------------------------|---|---|
| Разновидность щебня | Месторождение | Общий вид |
| Щебень песчаник (серый) | Обуховское месторождение Тульской области |  |
| Щебень песчаник (рыжий) | Апанасовское месторождение Ростовской области |  |
| Гранитный щебень | Павловское месторождение Воронежской области |  |

Важными характеристиками щебня являются: зерновой состав, насыпная плотность, дробимость в цилиндре, содержание зерен пластинчатой и игольной формы, содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц, содержание глины в комках, истираемость, морозостойкость и другие.

Все испытания щебня проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» [2], а также ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» [1].

Зерновой состав определялся рассевом аналитической пробы на стандартном наборе сит; содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц -

методом отмучивания. Определение марки по дробимости проводилось для щебня в сухом состоянии в цилиндре диаметром 150 мм при нагрузке 20000 кгс. Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы определялось с помощью специальных шаблонов и штангенциркуля. Морозостойкость щебня оценивали ускоренным методом по числу циклов насыщения в растворе серно-кислого натрия и высушивания. Истираемость устанавливали путем испытания щебня в полочном барабане.

Результаты и их обсуждение. В первую очередь был определен зерновой состав смеси фракций от 5 до 20 мм, представленный в табл. 3, который показывает, что гранулометрические составы и песчаника, и гранита относительно схожи.

Таблица 3

Зерновой состав смеси фракций (5 - 20 мм) щебня из песчаника и гранита

| Диаметр отверстий контрольных сит | Щебень песчаник (серый) | Щебень песчаник (рыжий) | Гранитный щебень |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| | Полные остатки на ситах, % | | |
| 1,25D _{наиб.} (25 мм) | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| D _{наиб.} (20 мм) | 5,99 | 2,6 | 2,4 |
| 0,5(d _{наим.} + D _{наиб.}) (12,5 мм) | 37,95 | 51,22 | 56,7 |
| d _{наим.} (5 мм) | 94,01 | 97,9 | 96,4 |
| d _{наим.} (2,5 мм) | 98,59 | 99,1 | 97,9 |

При анализе качества щебня важными показателями являются содержание в нем зерен пластинчатой и игловатой формы, содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц, зерен слабых пород, глины в комках. Результаты определения данных характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 4

Содержание разного вида примесей в пробах щебня из песчаника и гранита

| Наименование показателя | Щебень песчаник (серый) | Щебень песчаник (рыжий) | Гранитный щебень |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % | 14,2 (2 группа) | 18,0 (3 группа) | 22,2 (3 группа) |
| Содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц, % | 0,98 | 0,4 | 1,0 |
| Содержание глины в комках, % | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Содержание зерен слабых пород, % | 0,3 | 0,3 | 0,0 |

Анализируя данные табл. 4 можно сказать, что в данных образцах щебня песчаника содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц меньше, чем в гранитном щебне. Но при этом в составе песчаников обоих месторождений присутствует незначительное количество зерен слабых пород, что ухудшает свойства материала.

Также для ответственных строительных конструкций лучше выбирать щебень с низким процентом лещадности. В данном сравнении наименьшей лещадностью обладает серый песчаник.

Значения насыпной плотности, дробимости, истираемости и морозостойкости каждого щебня представлены в табл. 5.

Таблица 5

Основные характеристики щебня из песчаника и гранита

| Вид щебня | Наименование показателя | | | |
|------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | Насыпная плотность, т/м ³ | Марка щебня по дробимости | Марка щебня по истираемости | Марка щебня по морозостойкости |
| Песчаник (серый) | 1,44 | 1200 | И1 | F100 |
| Песчаник (рыжий) | 1,37 | 1000 | И1 | F100 |
| Гранит | 1,39 | 1400 | И1 | F300 |

Насыпная плотность всех анализируемых видов щебня практически одинакова. Самой высокой маркой по дробимости, также как и по морозостойкости обладает гранитный щебень. Истираемость идентична у всех щебней и соответствует марке И1.

Заключение. Совокупность полученных результатов исследований и испытаний позволяет сделать заключение, что щебень из песчаника обладает высокими качествами, не уступая по важнейшим показателям граниту, а по ряду свойств даже превосходит его, и может быть рекомендован как альтернатива гранитному щебню в качестве заполнителя в бетонных и железобетонных конструкциях, не подверженных многократному замораживанию и оттаиванию.

У щебня песчаника высокие показатели прочности, оптимальный зерновой состав и насыпная плотность, он экологичен, и при всем этом его стоимость невелика. Подводя итоги, хотелось бы сказать, что щебень песчаник достойный материал для широкого использования в строительстве.

Список литературы

1. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: дата введения 1995.01.01. М.: Стандартинформ, 2018. 13 с.
2. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний: дата введения 1998.01.07. М.: Стандартинформ, 2018. 50 с.
3. Микульский В.Г. Строительные материалы (Материаловедение. Строительные материалы) / В.Г. Микульский. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. 536 с.
4. Сементовский Ю.В. Строительные камни и заполнители бетона: справочник / Ю.В. Сементовский, П.П. Сенаторов; науч. ред. А.С. Филько. М.: Геоинформмарк, 1998. 24 с.
5. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона / С.М. Ицкович. М.: Высшая школа, 1991. 272 с.
6. Langer W.H. Construction Materials: Crushed Stone, Sand, and Gravel / W.H. Langer. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, ISBN: 978-0-08-043152-9, 2001. P. 1537-1545.
7. Горбунов Г.И. Основы строительного материаловедения (состав, химические связи, структура и свойства строительных материалов) / Г.И. Горбунов. М.: АСВ, 2002. 167 с.

References

1. GOST 8267-93. Crushed stone and gravel from dense rocks for construction work. Technical conditions: date of introduction 1995.01.01. M.: Standartinform, 2018. 13 p.

2. GOST 8269.0-97. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests: date of introduction 1998.01.07. M.: Standartinform, 2018. 50 p.
3. Mikulskiy V.G. Building materials (Materials Science. Building materials) / V.G. Mikulsky. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2004. 536 p.
4. Sementovsky Yu.V. Building stones and concrete aggregates: a reference book / Yu.V. Sementovsky, P.P. Senatorov; scientific ed. by A.S. Filko. M.: Geoinformmark, 1998. 24 p.
5. Itskovich S.M., Chumakov L.D., Bazhenov Yu.M. Technology of concrete aggregates / S.M. Itskovich. M.: Higher School, 1991. 272 p.
6. Langer W.H. Construction Materials: Crushed Stone, Sand, and Gravel / W.H. Langer. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, ISBN: 978-0-08-043152-9, 2001. P. 1537-1545.
7. Gorbunov G.I. Fundamentals of building materials science (composition, chemical bonds, structure and properties of building materials) / G.I. Gorbunov. M.: DIA, 2002. 167 p.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Сиденко Александра Алексеевна – студент группы БТТ-201 факультета инженерных систем и сооружений Воронежского государственного технического университета

ЭКОЛОГИЯ

УДК 502, 625.7

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОМФОРТА ЖИЗНИ В ГОРОДАХ
ПУТЕМ ИНТЕГРАЦИИ В ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА
ОБЪЕКТОВ ВЕЛОСИПЕДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

А.В. Ерёмин¹, В.П. Волокитин¹, С.Н. Букша², Ф.М. Абрамов^{1},
Е.В. Корнилов¹*

*¹Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

*²ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

**Адрес для переписки: Абрамов Федор Михайлович,*

E-mail: fabramov2001@mail.ru

В настоящее время решение задач экологического уровня является одним из важнейших для построения комфортной и безопасной жизни человека. Все чаще поднимается вопрос о переходе на более экологически чистые виды транспорта. Одним из них является велосипед. На данный момент необходимо заинтересовать население использовать альтернативный менее токсически опасный вид транспорта путем создания развитой и комфортной инфраструктуры в больших и маленьких городах. В статье описана проблема интеграции велосипедной инфраструктуры в общественные пространства и городскую среду. А так же приведены решения по созданию и размещению велопарковок, совмещенных с объектами ландшафтного дизайна и общественного транспорта.

Ключевые слова: велосипед; велосипедная инфраструктура; городская среда; велопарковка

IMPROVING THE ECOLOGICAL COMFORT OF LIFE IN CITIES BY INTEGRATING BICYCLE INFRASTRUCTURE FACILITIES INTO PUBLIC SPACES

A.V. Eremin¹, V.P. Volokitin¹, S.N. Buksha², F.M. Abramov^{1}, E.V. Kornilov¹*

¹Voronezh State Technical University,

Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letia Oktiabryast., 84

²Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin,

Russian Federation, 394064, Voronezh, ul. Starykh Bolshevikov, 54a

Corresponding author: Fedor M. Abramov, E-mail: fabramov2001@mail.ru

Currently, solving environmental-level problems is one of the most important for building a comfortable and secure human life. The issue of switching to more environmentally friendly modes of transport is increasingly being raised. One of them is a bicycle. At the moment, it is necessary to interest the population to use an alternative less toxic mode of transport by creating a developed and comfortable infrastructure in large and small cities. The article describes the problem of integrating bicycle infrastructure into public spaces and the urban environment. Solutions for the creation and placement of bike parks combined with landscape design and public transport facilities are also provided.

Keywords: bicycle; bicycle infrastructure; urban environment; bicycle parking

Введение. Развитие велодвижения стоит на повестке дня во многих городах России [1].

В последние десятилетия городские администрации всё более убеждаются в том, что возможность езды на велосипеде – это преимущество для городов [3].

В Воронеже примером данной тенденции служит создание места движения для велосипедистов в рамках реконструкции проспекта Революции в 2021 году.

Постановка проблемы. Однако перед людьми, ответственными за принятие решений, и специалистами, наплечи которых ложится работа по реализации этих планов, встаёт множество вопросов [2]:

Как разработать эффективную стратегию развития велодвижения?

Какой подход лучше всего подойдёт нашему городу?

Как создать высококачественную инфраструктуру?

Как стимулировать людей использовать велотранспорт и развивать велосипедную культуру? [1].

Если у нас есть цель, чтобы велосипед действительно стал одним из видов городского транспорта, наши города должны предоставлять возможности для этого [1].

Вариант решения. Раскрыть такой высокий потенциал велодвижения можно, если езда на велосипеде будет физически возможна, безопасна и привлекательна. Только в этом случае велосипед в городах сможет составить конкуренцию автомобилю, что безусловно положительно скажется на экологическом состоянии городской среды и физическом здоровье жителей.

Одним из ключевых шагов является интеграция объектов велосипедной инфраструктуры в городскую среду и общественные пространства, которого зачастую и так не хватает. Это означает, что необходимо совмещать потребности различных категорий горожан, при этом следить за тем, чтобы интересы одних, не становились поперек интересов других [1].

В статье предложен ряд объектов, которые возможно интегрировать в общественные городские пространства с целью популяризации передвижения на велосипедном транспорте.

Модели выполнены в системе Renga, визуализированы в Twinmotion.

Велопарковка совмещенная с малой архитектурной формой.

Представляет собой велопарковку, которая оснащена сидячими местами по периметру. По центру имеется зона для посадки небольших декоративных деревьев, кустарников или клумбы (рис. 1, рис. 2).



Рис. 1. Визуализация варианта использования велопарковки, совмещенной с зоной отдыха

Такой объект гармонично впишется на входах пешеходных зон, парках и дворах.

Таким образом, получается эстетически привлекательная велопарковка, добавляющая площадь озеленения участка городской территории.

На рис.2 представлен вариант размещения данного объекта на Петровской набережной г.Воронеж.



Рис. 2. Вариант совмещения велостоянки и ландшафтной композиции (вид на левый берег р. Воронеж)

Следующий объект – станция зарядки электровелосипедов с возможностью подкачки шин (рис. 3), совмещенная с остановочным павильоном (рис. 4).



Рис. 3. Визуализация модели остановки общественного транспорта, совмещенной с велопарковкой (вид сзади)

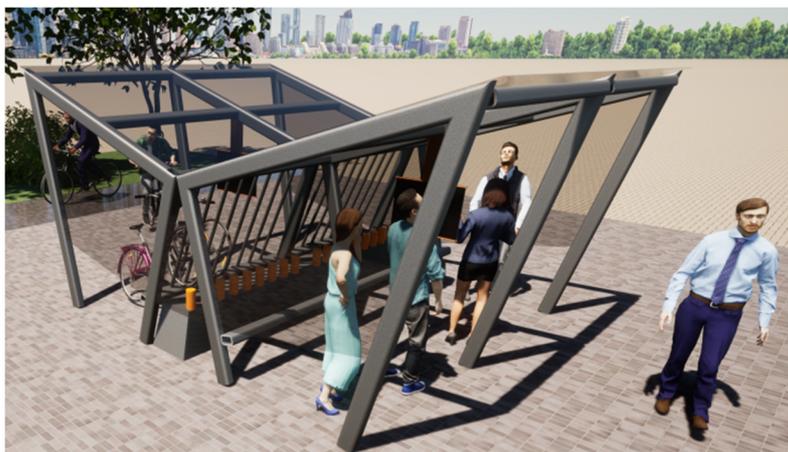


Рис. 4. Визуализация модели остановки общественного транспорта, совмещенной с велопарковкой (вид спереди)

Между двумя блоками расположен распределительный блок с воздушными компрессорами и кабелями электрической сети 220В. Оплата за услуги производится в стоящем рядом терминале.

Данный проект рекомендуется размещать рядом с торгово-развлекательными центрами, спортивными комплексами и местами досуга горожан.

Еще один вариант – спаренная скамейка, разделенная зоной парковки велосипедов, размер которой может изменяться, в зависимости от необходимости размещения в конкретной локации.

Актуально размещение на набережных, пешеходных улицах, в лесопарковых зонах.



Рис. 5. Визуализация модели остановки общественного транспорта, совмещенной с велопарковкой (вид спереди)

На рис. 5 представлен вариант размещения объекта на набережной Авиастроителей в г. Воронеж.

Заключение. Подводя итог, можно сказать о том, что с развитием велоинфраструктуры в городах, несомненно, сделает использование такого вида передвижения более привлекательным. Соответственно вырастет число его пользователей, что положительно скажется на экологическом состоянии городской среды и здоровье горожан.

Список литературы

1. Независимая частная исследовательская и консалтинговая компания [Электронный ресурс]. <https://www.rupprecht-consult.eu>.
2. Электронная библиотека Тольяттинского государственного университета [Электронный ресурс]. <https://dspace.tltsu.ru/bitstream>.
3. Смирнов А.В., Вережка Т.В. Перехватывающие велостанции, как способ развития инфраструктуры Санкт-Петербурга / Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли в 3-х частях, 2019. Т. 2. С. 113-116.

References

1. Independent private research and consulting company [Electronic resource]. <https://www.presto-cycling.eu>.
2. Electronic Library of Togliatti State University [Electronic resource]. <https://dspace.tltsu.ru/bitstream>.
3. Smirnov A.V., Rope T.V. Intercepting bicycle stations as a way to develop the infrastructure of St. Petersburg / Institute of Industrial Management, Economics and Trade in 3 parts, 2019. T. 2. P. 113-116.

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Волокитин Владимир Павлович – канд. техн. наук, доцент, преподаватель кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Букша Сергей Николаевич – канд. техн. наук, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Абрамов Фёдор Михайлович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

А.В. Волокитина¹, А.В. Ерёмин¹, С.Н. Букша², Е.В. Корнилов^{1},
Ф.М. Абрамов¹*

¹*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

²*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

**Адрес для переписки: Корнилов Евгений Владимирович,
E-mail: jenua8885@gmail.com*

В настоящее время основным источником загрязнения окружающей среды являются автомобили, работающие на двигателе внутреннего сгорания. По этой причине очень быстро набирает популярность транспорт, работающий на электрической энергии. К сожалению инфраструктура для зарядки электромобилей малоразвита. В связи с этим мы предлагаем оптимальное решение, которое не только не займёт много времени, но и сделают электротранспорт более доступным для потребителя – внедрение беспроводной зарядки в проезжую часть. В статье описан один из самых современных и перспективных способов беспроводной зарядки электромобилей с использованием технологий компании Elect Reon.

Ключевые слова: электромобиль; беспроводная зарядка; Elect Reon

USING THE WIRELESS CHARGER FOR ELECTRIC VEHICLES

A.V. Volokitina¹, A.V. Eremin¹, S.N. Buksha², E.V. Kornilov^{1}, F.M. Abramov¹*

¹*Voronezh State Technical University,*

Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letia Oktiabryast., 84

²*Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin,*

Russian Federation, 394064, Voronezh, ul. Starykh Bolshevikov, 54a

**Address for correspondence: Kornilov Evgeny Vladimirovich,*

E-mail: jenya8885@gmail.com

Currently, the main source of environmental pollution is cars powered by an internal combustion engine. For this reason, electric-powered vehicles are gaining popularity very quickly. Unfortunately, the infrastructure for charging electric vehicles is poorly developed. In this regard, we offer an optimal solution that will not only take a lot of time, but will also make electric transport more accessible to the consumer—the introduction of wireless charging into the roadway. The article describes one of the most modern and promising ways to wirelessly charge electric vehicles using Elect Reon technologies.

Keywords: electric car; wireless charger; Elect Reon

Введение. Электромобили на батарейках (BEV) развиваются и набирают популярность ускоренными темпами. Несмотря на значительный прогресс в области оборудования и инфраструктуры, подзарядка по-прежнему занимает значительно больше времени, чем заправка автомобиля, работающего на ДВС.

Методика исследования. Израильская технологическая компания Elect Reon разрабатывает и внедряет инновационное решение этой проблемы. Суть технологии заключается в следующем: перед укладкой асфальтобетонного или цементобетонного покрытия размещаются медные пластины (рис. 1, рис. 2), которые подключаются к блокам управления на обочинах, а электромобили, движущиеся по дороге, снабжаются приёмниками беспроводной энергии.

Размеры одной секции медных пластин: длина 120 см, ширина 50 см, толщина 3 см. Зарядные устройства передают электричество при помощи магнитного поля, которое колеблется с частотой резонирующей вибрации в маг-

нитных катушках на приемном устройстве. Это позволяет заряжать аккумуляторы непосредственно во время движения.

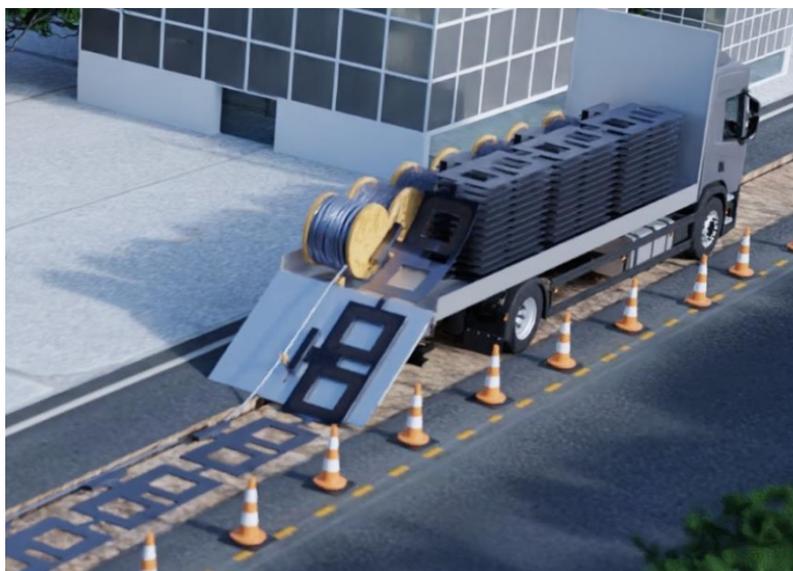


Рис. 1. Процесс разгрузки и установки медных пластин



Рис. 2. Маркировка и соединение медных пластин между собой

Технология беспроводной зарядки Elect Reon используется в специально отведенных зонах и вдоль общественных дорог, что позволяет электронным автомобилям удобно заряжаться в течение всего рабочего дня. Это уменьшает потребность в тяжелых батареях и выравнивает кривую спроса на электроэнергию.

Данное комплексное решение включает в себя подземную инфраструктуру и современное программное обеспечение для управления зарядкой. Проект

требует, чтобы блок управления передачи электроэнергии был расположен на обочине, то есть в непосредственной близости у дороги, а приёмник беспроводной энергии был установлен в шасси каждого транспортного средства (рис. 3.) [1].

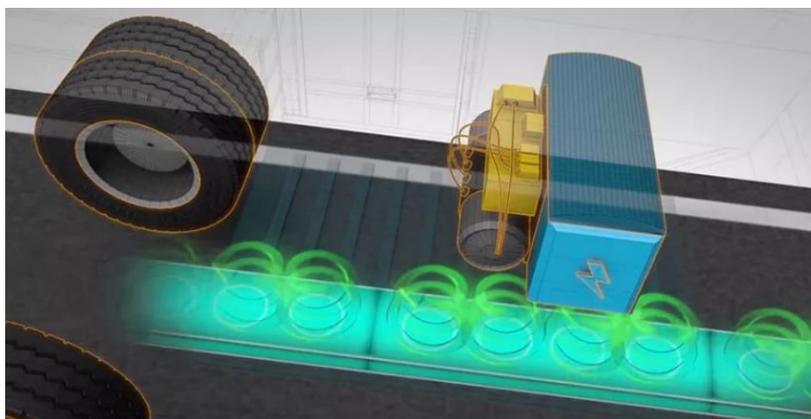


Рис. 3. Схема расположения устройства для приёма беспроводного заряда

В настоящий момент времени не существует какого-либо серийного варианта электрического транспортного средства с установленной системой беспроводной зарядки с завода.

Процесс зарядки осуществляется следующим образом: Блок управления передает питание от электросети на сегменты катушки беспроводной зарядки в дороге, когда авторизованный автомобиль находится непосредственно над сегментом дороги (рис. 4, рис. 5). Связь с транспортными средствами осуществляется в режиме реального времени [1].



Рис. 4. Визуальное представление расположения пластин под проезжей частью

Автомобиль, оборудованный специальным устройством для приёма беспроводной энергии получает её от медных катушек, расположенных под ездовым полотном (рис. 3.) и передаёт её на аккумулятор транспортного средства [1].



Рис. 5. Авторизации автомобиля во время подзарядки

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В Швеции компания построила экспериментальную дорогу длиной 1,65 километра. Для первых полноценных испытаний по ней запустили 40-тонный электрический магистральный тягач (рис. 6), который оснастили пятью беспроводными модулями по 20 кВт [3].



Рис. 6. Испытания электрического грузового автомобиля в городе Готланд, Швеция

В итоге тестовый грузовой автомобиль продемонстрировал способность получения на ходу до 70 кВт энергии. Также во время испытаний было доказано, что неблагоприятные погодные условия, а именно снег и лёд не влияют на возможности беспроводной зарядки.

Аналогичный испытательный комплекс Elect Reon развёртывают в Тель-Авиве (рис. 7.). Этот проект беспроводной электрической дороги включает в себя беспроводную электрическую зарядную станцию на автобусной остановке железнодорожного вокзала Тель-Авивского университета, которая заряжает стационарный электронный автобус, когда пассажиры садятся и выходят из транспортных средств [2].

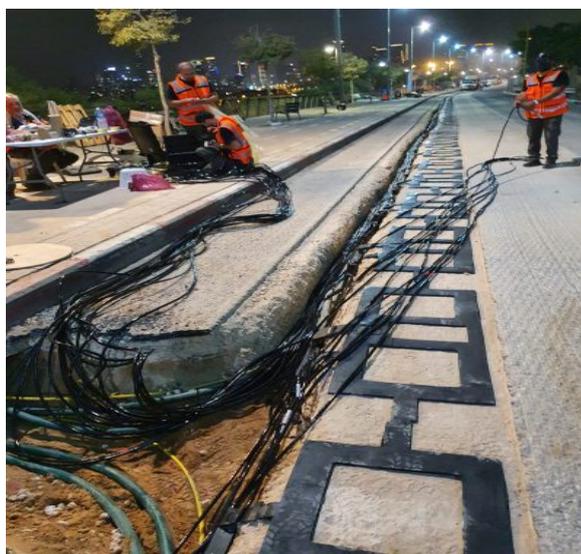


Рис. 7. Строительство участка автомобильной дороги с беспроводной зарядкой в городе Тель-Авив, Израиль

Данная стратегия зарядки позволяет оптимально использовать время простоя на первой остановке маршрута для зарядки автобуса. Так же во время тестовых заездов была произведена зарядка компактного хэтчбэка с объёмом батареи 22 кВт*ч. Максимальная скорость зарядки во время тестирования составила порядка 8.5 кВт.

К недостаткам на данный момент можно отнести низкий КПД, который варьируется от 25 % до 75 %. Такой большой разброс зависит от дорожного

просвета транспортного средства и от толщины асфальтобетонного или цементобетонного покрытие, под которым находятся медные пластины. Так же недостатком является высокая реализация технологии в настоящее время. Стоимость участка автомобильной дороги с беспроводной зарядкой, протяжённостью 800 м, составляет 12 миллионов долларов.

В процессе испытаний было доказано, что беспроводные зарядные устройства не должны представлять опасности для здоровья, потому что даже те, которые достаточно мощны для автомобилей, могут создавать магнитные поля, соответствующим установленным правилам безопасности.

Заключение. Внедрение данной технологии является необходимым этапом для перехода от транспортных средств, работающих на двигателе внутреннего сгорания на электромобили. Применение технологий беспроводной зарядки прямо во время движения снизит потребности в установке стационарных зарядных станций, увеличит дальность электромобилей, а также позволит их производителям использовать менее ёмкие и, как следствие, более доступные аккумуляторы.

Список литературы

1. Беспроводная зарядка здесь есть все, что угодно // Electreon URL: <https://electreon.com/> (дата обращения: 06.04.2023).
2. Электрокары в Швеции научились заряжаться прямо от дороги // Авто.ру URL: <https://auto.ru/> (дата обращения: 07.04.2023).
3. Швеция успешно тестирует дорожный набор для беспроводной зарядки, который революционизирует мобильность // Autoevolution URL: <https://www.autoevolution.com/> (дата обращения: 07.04.2023).

References

1. Wireless charging has everything you need here // Electron URL: <https://electreon.com/> (date of application: 06.04.2023).

2. Electric cars in Sweden have learned to charge directly from the road // Avto.ru URL: <https://auto.ru/> (accessed: 04/07/2023).

3. Sweden is successfully testing a wireless charging travel kit that revolutionizes mobility // Autoevolution URL: <https://www.autoevolution.com/> (accessed: 07.04.2023).

Волокитина Анастасия Владимировна – студентка группы МТПАД-221 Воронежского государственного технического университета

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Букша Сергей Николаевич – канд. техн. наук, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Абрамов Фёдор Михайлович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

УДК 502, 625.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕШЕХОДНЫХ ГАЛЕРЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО И ТОКСИЧНОГО ВЛИЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ЗДОРОВЬЕ ЛЮДЕЙ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

***В.П. Волокитин¹, А.В. Ерёмин¹, С.Н. Букша², Ф.М. Абрамов^{1*},
Е.В. Корнилов¹***

¹*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

²*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

**Адрес для переписки: Абрамов Федор Михайлович,*

E-mail: fabramov2001@mail.ru

Развитие сети автомобильных дорог в городской черте, зачастую приводит к приближению экологически опасных участков непосредственно к жилым зонам и местам интенсивного движения пешеходов, получающих серьезную долю токсичных выбросов от движения транспортных средств. В статье приведено архитектурно - конструктивное решение использования акустических экранов с целью усиления защиты прилегающих территорий, так и протекции зоны тротуара от вредного шумового и токсичного воздействия автомобильных дорог.

Ключевые слова: акустический экран, шумозащитный экран, снижение уровня шума, защищенный тротуар, защита пешеходов

THE USE OF PEDESTRIAN GALLERIES TO REDUCE THE ACUTE AND TOXIC IMPACT OF HIGHWAYS ON HUMAN HEALTH AND THE ENVIRONMENT

© Волокитин В.П., Ерёмин А.В., Букша С.Н., Абрамов Ф.М., Корнилов Е.В., 2023

¹*Voronezh State Technical University,*

Russian Federation, 394006, Voronezh, 20-letia Oktiabryast., 84

²*Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin,*

Russian Federation, 394064, Voronezh, ul. Starykh Bolshevikov, 54a

Corresponding author: Fedor M. Abramov, E-mail: fabramov2001@mail.ru

The development of a network of highways in the urban area often leads to the approach of environmentally hazardous areas directly to residential areas and places of intensive movement of pedestrians who receive a serious share of toxic emissions from the movement of vehicles. The article presents an architectural and constructive solution for the use of acoustic screens in order to strengthen the protection of adjacent territories and the protection of the sidewalk zone from harmful noise and toxic effects of highways.

Keywords: acoustic screen, noise-proof screen, noise reduction, protected sidewalk, pedestrian protection

Введение. Акустический экран – это конструкция, возводимая вдоль крупных проспектов, автомагистралей, железнодорожных путей для уменьшения шума. Располагается, как правило, на высокоскоростных магистралях проходящих мимо жилых и офисных районов. Установка экрана может значительно повысить цену недвижимости и земли в этом районе, а также уменьшает шумовое загрязнение [1].

Так же, акустические экраны могут выполнять ряд других функций:

- защита пешеходов, движущихся по тротуарам вдоль автомобильной дороги от высокого уровня шума;
- защита пешеходов от выбросов вредных веществ в процессе эксплуатации автомобилей и самой дороги.

Постановка проблемы. На рис. 1. представлен экран, защищающий близлежащие здания от шумового воздействия автомобильной дороги. Однако,

как можно заметить, тротуар отделен от проезжей части лишь барьерным ограждением. Как следствие, пешеходы условно защищены лишь от физического воздействия проезжающих транспортных средств.



Рис. 1. «Классический» способ установки акустических экранов

Существует вариант полного скрытия проезжей части шумозащитными экранами (рис. 2) на приемном устройстве.

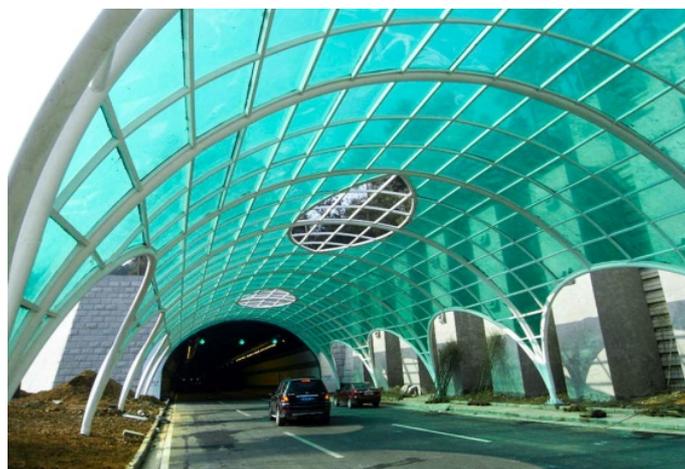


Рис. 2. Полная изоляция проезжей части дороги акустическими экранами

Однако данный метод имеет ряд недостатков:

- повышенная температура над проезжей частью, особенно в теплое время года;

- необходимость обустройства вентиляции с целью вывода CO_2 и поступления притока O_2 в зону эксплуатации.

Вариант решения. Наиболее доступным вариантом служит использование дополнительных акустических экранов между проезжей частью и тротуаром (рис. 3).

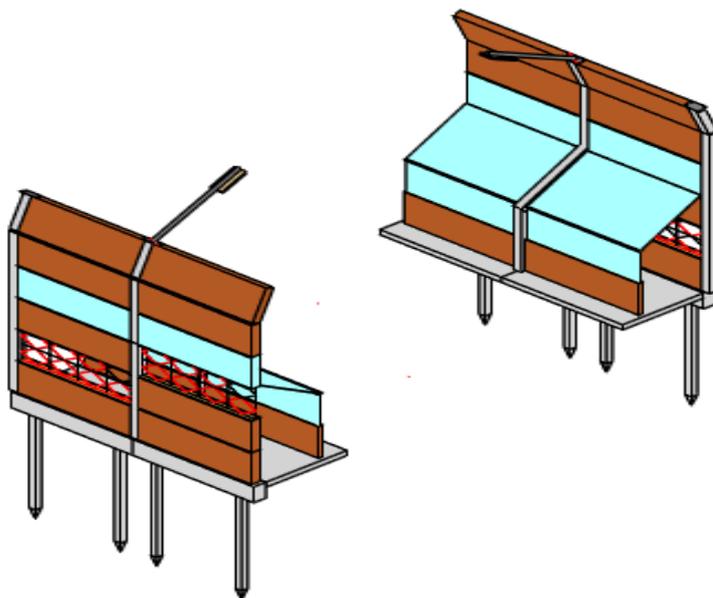


Рис. 3. Модель пешеходной акустической галереи

Данное решение не только снижает шумовое воздействие на близлежащие территории, но и защищает пешеходов от акустического воздействия и вредных выбросов, образующихся в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Интенсивное дорожное движение дает звуковое воздействие до 100 дБ, использование одного ряда шумозащитных экранов может снизить этот показатель практически на 40 дБ (табл.).

Таблица

Индексы изоляции воздушного шума использованных акустических панелей

| Толщина панели, мм | Индекс звукоизоляции, дБ |
|--------------------|--------------------------|
| 100 | 32 |
| 200 | 38 |

В местах использования дополнительного ряда панелей (используемых с целью защиты тротуара), индекс звукоизоляции доходит до 70 дБ (график на рис. 4). Из чего следует, что от изначального шумового воздействия остается порядка 30 %.

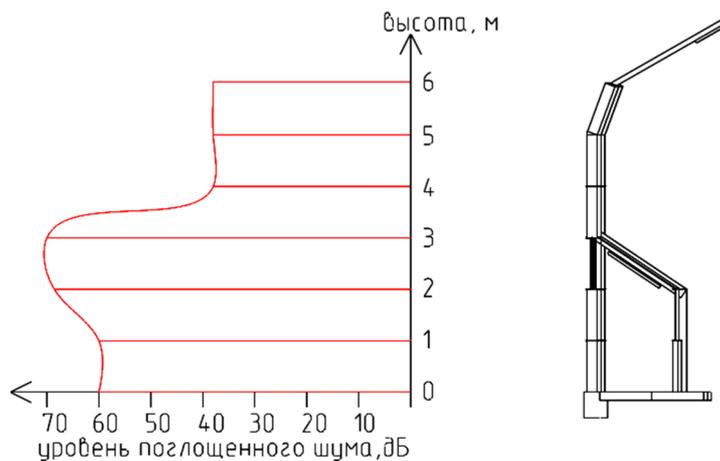


Рис. 4. График поглощения уровня шума используемыми акустическими панелями

Проектом предусмотрено:

- освещение пешеходной зоны (кабеленесущая система показана синим цветом на рис. 5);
- интеграция опор освещения проезжей части в опоры акустических экранов (кабеленесущая система показана красным цветом на рис. 5).

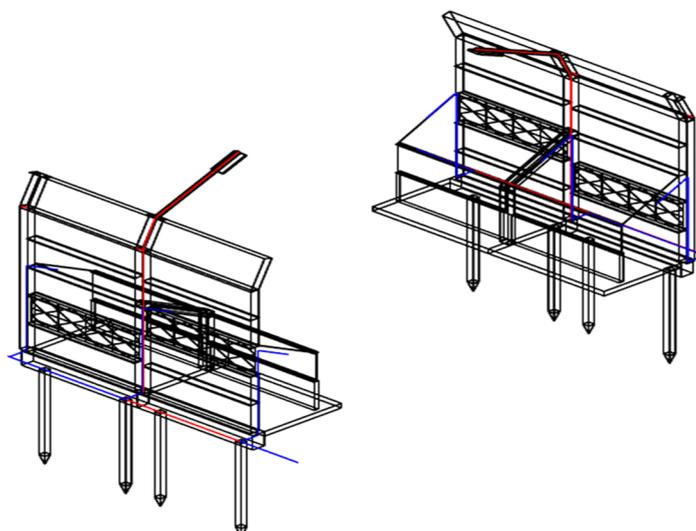


Рис. 5. Схема электрификации пешеходной зоны и проезжей части

В светлое время суток предусмотрено поступление дневного света через прозрачные ПШТ-панели (указаны лазурным цветом на рис. 3).

Приток воздуха осуществляется за счет размещения вентиляционных окон со стороны, обратной относительно проезжей части автомобильной дороги.

Визуализация проекта представлена на рис. 6.



Рис. 6. Визуализация проекта

Заключение. Подводя итог, можно сказать о том, что применение акустических экранов, защищающих тротуар способствует не только снижению звукового воздействия на прилегающие территории, но и служит защитой пешеходной зоны от выбросов и акустического влияния, которые образуются в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Список литературы

1. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Канева Е.В., Кучерова А.С. О роли шумовой агрессии на комфортность среды обитания человека / Вестник Белго-

родского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. С. 40-47.

References

1. Zagorodnyuk L.H., Lesovik V.S., Kaneva E.V., Kucheroва A.S. On the role of noise aggression on the comfort of human habitat / Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. P. 40-47.

Волокитин Владимир Павлович – канд. техн. наук, доцент, преподаватель кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Букша Сергей Николаевич – канд. техн. наук, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Абрамов Фёдор Михайлович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

БИОФИЗИКА

УДК615.84:611.72

**АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ
НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХРЯЩЕВОЙ ТКАНИ**

А.И. Отченашенко^{1}, В.В. Корнеева²*

*¹Национальный исследовательский ядерный университет
Московского инженерно-физического института,
Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31*

*²Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84*

**Адрес для переписки: Отченашенко Александр Иванович,*

E-mail: alot.zte@gmail.com

Имеется много свидетельств того, что электрические потенциалы воздействуют на хондроциты в суставном хряще. Исследования также показали, что электрическая стимуляция способствует росту хондроцитов и синтезу внеклеточной матрицы, ускоряя заживление повреждений хряща. Это может привести к использованию электрической стимуляции (ЭС) для восстановления хрящевой ткани. В обзоре рассматривается применение электрической стимуляции для восстановления суставного хряща, включая хондрогенную дифференциацию мезенхимальных стволовых клеток, индуцированную электрической стимуляцией, а также использование пьезоэлектрических материалов в создании искусственного суставного хряща. В обзоре также рассматриваются клинические стратегии лечения подобных повреждений и последние достижения в тканевой инженерии.

Ключевые слова: электрическая стимуляция, регенерация суставного хряща, пьезоэлектрические биоматериалы, инженерия тканей суставного хряща, мезенхимальные стволовые клетки

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRICAL STIMULATION ON
ARTICULAR CARTILAGE REGENERATION, WITH PARTICULAR
ATTENTION TO THE USE OF PIEZOELECTRIC BIOMATERIALS FOR
REPAIR AND ENGINEERING OF ARTICULAR CARTILAGE TISSUE**

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

*¹National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute,
Russian Federation, 115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31*

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

**Corresponding author: Alexander I. Otchenashenko, E-mail: alot.zte@gmail.com*

There is a lot of evidence that electrical potentials affect chondrocytes in articular cartilage. Studies have also shown that electrical stimulation promotes the growth of chondrocytes and the synthesis of extracellular matrix, accelerating the healing of cartilage damage. This can lead to the use of electrical stimulation (ES) to repair cartilage tissue. The review includes consideration of the use of electrical stimulation in the restoration of articular cartilage, including chondrogenic differentiation of mesenchymal stem cells induced by electrical stimulation, as well as the use of piezoelectric materials in the creation of artificial articular cartilage. The review also examines clinical strategies for the treatment of articular cartilage injuries and progressive advances in tissue engineering.

Keywords: electrical stimulation, articular cartilage regeneration, piezoelectric biomaterials, articular cartilage tissue engineering, mesenchymal stem cells

Введение. Заболевание, связанное с повреждением хрящевой ткани в суставах, негативно сказывается на здоровье людей всех возрастов. К 2030 году ожидается увеличение заболеваемости этим видом патологии на 30 %.

Суставной хрящ является типом хрящевой ткани, которая имеет сложную структуру и высокую механическую прочность. Его основная функция – обеспечивать плавное движение в суставах, обеспечивая опорную нагрузку и снижение трения. Хрящ делится на три типа в зависимости от матрицы, которая определяет его свойства. Так как суставной хрящ не имеет сосудов и нервов, он уязвим для жестких биомеханических условий. К сожалению, его естественные возможности восстановления ограничены, что может привести к неизлечимым повреждениям. Из-за уникальной структуры, лечение и восстановление суставов является сложным процессом.

Существуют различные методы лечения повреждений хряща, включая микрофрактуру (МФ), аутологичную и аллогенную трансплантацию хондроцитов. Несмотря на широкое применение, эти методы имеют недостатки, такие как образование фиброзного материала и ограниченность доступности доноров. Тканевая инженерия представляет собой многообещающий подход для восстановления поврежденных тканей, таких как кожа, сердце и кости. Она использует биоматериалы, клетки и регуляторы для создания биологических замен, которые могут восстановить, поддерживать или улучшать функцию тканей. При создании искусственного суставного хряща нужно учитывать физические и химические факторы, регулирующие поведение клеток, чтобы создать структуры и регуляторы, максимально приближенные к естественному состоянию в организме.

Физиологическое электрическое поле (ЭП) играет значительную роль в активности клеток во время их развития. В связи с этим, электрическая стимуляция может регулировать увеличение пролиферации, дифференциации и синтеза внеклеточного матрикса (ВКМ) *in vitro*. Биоэлектрические сигналы распространяются по всему телу, однако хрящевые ткани реагирует на них сильнее, чем иные. Было установлено, что ЭП стимулирует пролиферацию клеток и производство химических веществ, связанных с ВКМ суставного хряща, таких как коллаген II типа, агрекан и гликозаминогликаны (ГАГ). В исследованиях

использовался постоянный ток (DC) ЭП для стимуляции восстановления хряща, а биполярный ток был показан для восстановления гиалинового хряща.

Использование электрических стимуляторов в клинике затруднено проблемами, связанных с текущими устройствами ЭС, которые работают через контакты DC или ёмкостную связь. Это продуцирует высокий риск инфекции, болезненную процедуру имплантации и стресс, вызванный хирургическим вмешательством.

Исследования показали, что пьезоэлектрические материалы могут менять свои физические свойства, чтобы производить электрические сигналы без внешнего питания. При нормальных движениях тела, таких как сжатие, кручение или при воздействии внешних стимулов, например вибрации или ультразвука, пьезоэлектрические материалы генерируют электрические сигналы. Таким образом, возможно создание имплантируемых пьезоэлектрических устройств, которые будут генерировать электрический стимул при движении сустава, что позволит создать электрический стимулятор, который будет способствовать росту хрящевой ткани без необходимости использования батарей.

В данном обзоре описан процесс развития травмы суставного хряща и рассмотрены существующие клинические методы лечения, а также использование ЭС для регенерации суставного хряща. Подробно изучается индуцированная ЭС с процессом хондрогенной дифференциации мезенхимальных стволовых клеток (МСК) и возможные механизмы управления этим процессом. Кроме того, обсуждается потенциал применения пьезоэлектрических материалов в создании суставной хрящевой ткани и выделяются значимые достижения в области тканевой инженерии.

Основные принципы. Суставной хрящевой тканью называется плотная соединительная ткань, состоящая главным образом из клеток и внеклеточного матрикса, включающего коллаген, протеогликаны, неколлагеновые белки и тканевую жидкость. Незрелые хондробласты способные к пролиферации и дифференциации в зрелые хондроциты, также входят в состав хрящевой ткани. Она не содержит нервных окончаний и кровеносных сосудов, ее питание осу-

ществляется синовиальной жидкостью и артериальными ветвями вокруг синовиального слоя суставной капсулы. Хондроциты находятся между коллагеновыми волокнами и поддерживают нормальный метаболизм. Хрящевая ткань гладкая, эластичная и способна поглощать и распределять нагрузки. Однако при повреждении эта способность уменьшается, что приводит к дегенерации ткани.

Повреждения в суставах могут привести к серьезным проблемам с опорно-двигательным аппаратом. При повреждении поверхности хряща наблюдается ускоренный износ сустава. Такой процесс вызывает катаболическое состояние, наносящее ущерб суставу. Однако хрящевая ткань не обладает хорошей способностью к самовосстановлению, и ее повреждение часто приводит к развитию остеоартроза.

Электростимуляция. В хрящевых тканях происходит естественное электромеханическое преобразование, аналогичное тому, что происходит в костной ткани, за счет потенциалов потока и диффузии. При движении сустава или под нагрузкой, жидкость проходит через ионизированные макромолекулы, прикрепленные к хрящевой ткани, что создает электрический потенциал. Разрушение хрящевой матрицы приводит к потере этой микросреды, что нарушает электрическое поле, необходимое для гомеостаза тканей. Таким образом, механическое, электрическое и электромагнитное воздействие могут играть важную роль в регулировании гиалинового хряща как в нормальных, так и в патологических условиях.

Многочисленные исследования показали, что электрическая стимуляция может способствовать развитию и зрелости хрящевой ткани. Этот эффект достигается благодаря воздействию на мембрану клеток, вызывающему перенос ионов через нее и увеличение уровня кальция внутри клеток. Это, в свою очередь, активирует гены, отвечающие за выработку веществ, способствующих развитию ткани. В результате, электрическая стимуляция повышает уровень белков, характерных для хрящевой ткани, таких как COL2 α 1, агрекан и Sox9, а

также снижает уровень коллагена I типа. Все эти эффекты обуславливают дифференциацию МСК в сторону гиалиновых хондроцитов.

Электрическая стимуляция может способствовать хондрогенезу в мышечно-скелетной системе. В данном контексте, в категорию ЭС включаются электромагнитные поля (ЭМП) и электрические поля, поскольку они связаны и могут превращаться друг в друга. Исследование показало, что постоянные ЭП увеличивают экспрессию белков матрикса хряща и способствуют дифференцировке МСК в хондроциты.

ЭМП также воздействуют на процессы образования костной и хрящевой ткани. Например, низкочастотные ЭМП (частотой 15 Гц и магнитной индукцией 5 мТл) могут увеличивать выражение гена COL2 α 1 и содержание ГАГ в мезенхимальных стволовых клетках костного мозга (BMSCs), что свидетельствует о возможности ЭМП стимулировать и поддерживать образование хрящевой ткани в BMSCs. Научное объяснение эффекта стимуляции заживления костей при помощи магнитных полей основывается на связи между электрической активностью, вызванной механической нагрузкой, и образованием костной ткани.

В исследованиях на клеточных моделях человеческих тканей ЭМП значительно увеличивают уровни маркеров хрящевой ткани, таких как ГАГ и COL2 α 1. Для достижения оптимального результата необходимо точно определить параметры, такие как частота, интенсивность и длительность воздействия.

Применение ЭС оказывает влияние на стволовые клетки, что ведет к получению эффективных результатов в процессах инженерии тканей. Для использования этой методики в клинических целях необходимо провести дополнительные исследования, чтобы понять механизмы сигнальных путей, участвующих в регулировании процесса хондрогенной дифференциации, который контролируется при помощи ЭС.

Молекулярные механизмы вызванные ЭС. ЭС может не только способствовать производству химических веществ, которые помогают восстановить поврежденный хрящ, но и контролировать размножение и превращение МСК. МСК играют ключевую роль в естественных процессах формирования и

восстановления хрящевой ткани благодаря своим биологическим свойствам и потенциалу превращения в различные типы клеток. Механизмы, регулирующие пролиферацию и превращение МСК, достаточно изучены, и в данном контексте акцентируется внимание на потенциальных сигнальных путях, которые участвуют в регуляции хондрогенной дифференцировки МСК при помощи ЭС (рис. 1).

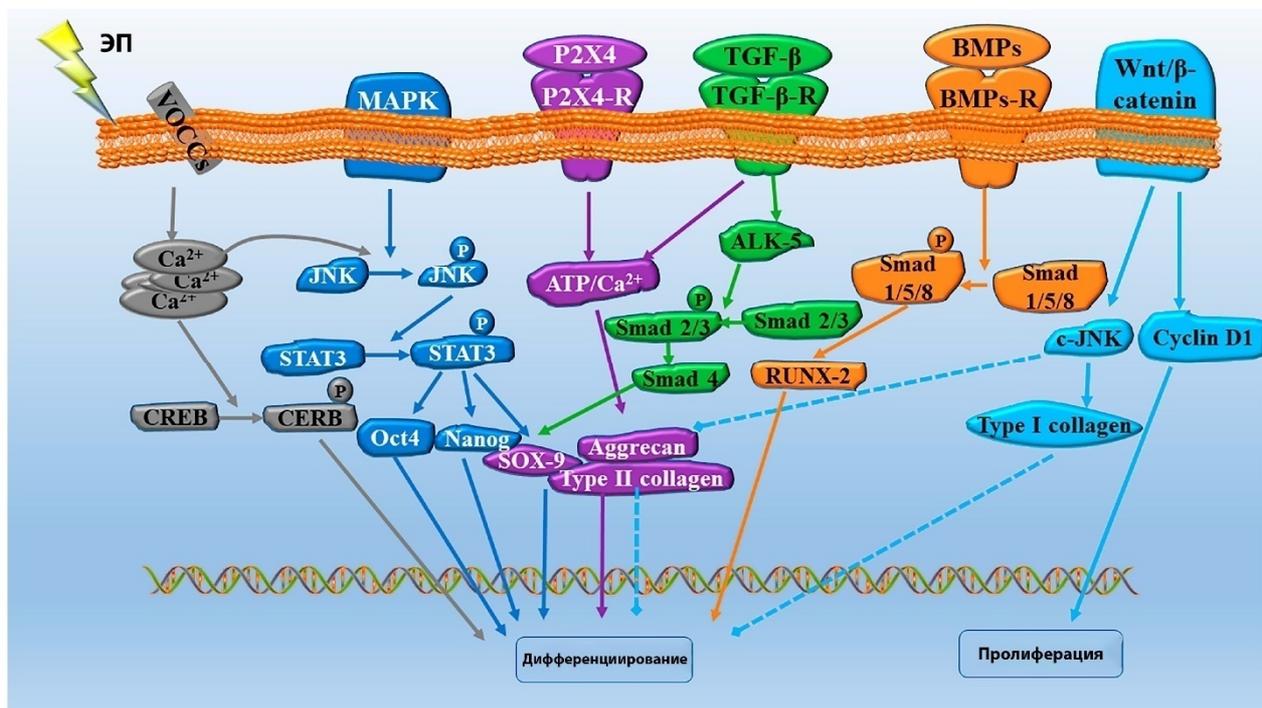


Рис. 1. Сигнальные пути, участвующие в процессах пролиферации и хондрогенной дифференциации МСК, вызванные электрической стимуляцией

Электрическая стимуляция усиливает поступление Ca^{2+} в клетку через потенциал-управляемые кальциевые каналы (VOCCs), который фосфорилирует транскрипционный фактор CREB и способствует хондрогенной дифференциации МСК. Электрическая стимуляция усиливает хондрогенный потенциал МСК через сигнальный путь JNK/CREB-STAT3. Под воздействием электрической стимуляции P2X4 может запускать внутриклеточный поток Ca^{2+} в ответ на взаимодействие с молекулами АТФ, что способствует хондрогенному процессу. Электрическая стимуляция способствует действию TGF- β на рецепторы TGF- β , расположенные на МСК. Под воздействием ЭС костные морфогенетические

белки (BMP) могут связываться с рецепторами BMP и способствовать хондрогенной дифференциации. Электрическая стимуляция способствует пролиферации и ингибирует хондрогенную дифференциацию МСК через сигнальный путь Wnt/ β -catenin.

ЭС является очень эффективным средством для стимуляции роста и восстановления хрящевой ткани. Она способствует дифференциации клеток путем активации кальциевых транзитов, что в свою очередь активирует кальмодулин и его сигналы. Часть исследований показало, что ЭС снижает уровень коллагена I типа и повышает экспрессию хондрогенных маркеров, таких как COL2 α 1, агрекан и Sox9, что способствует хондрогенной дифференциации. Кальций входит в клетку преимущественно через VOCCs и несколько исследований указывают на важную роль VOCCs в развитии хрящевой ткани, особенно на ранних стадиях, поскольку ингибирование VOCCs в стволовых клетках может привести к плохому хондрогенезу.

ЭС может вызывать различные биологические реакции, включая активацию ионных каналов и рецепторов на клеточных мембранах. Это в свою очередь инициирует сигнальные пути, которые могут способствовать конденсации МСК и хондрогенезу. Некоторые из ключевых сигнальных путей, связанных с ЭС и хондрогенезом, включают экспрессию BMP, MAPK, Wnt, JNK, CREB и STAT3. Внутриклеточный кальций также играет важную роль в активации некоторых из этих сигнальных путей.

Выводы. В данном обзоре подведены итоги по патогенезу травмы хряща и современным клиническим стратегиям лечения таких травм. Особое внимание уделено использованию электрической стимуляции для лечения суставного хряща и восстановлению хрящевой ткани. Метод является эффективным в лечении дефектов хрящевой ткани, так как способен индуцировать хондрогенную дифференциацию МСК для создания инженерной хрящевой ткани *invitro*. Применение комбинации клеток, опорных материалов и электрической стимуляции определенно дает положительные результаты. Благоприятные терапевтические

преимущества электрической стимуляции на уровне ткани заставляет ученых изучать основные биологические механизмы.

Однако, определение подходящих параметров для электрической стимуляции, которые могут способствовать хондрогенной дифференциации МСК, является сложной задачей из-за различий в экспериментальных процедурах, условиях и используемых биоматериалах. Поэтому, предложено сфокусироваться на определении опорных материалов, таких как электропроводные и пьезоэлектрические материалы.

Эти материалы, как специальный вид электромеханических систем, могут генерировать и передавать биоэлектрические сигналы, которые схожи с естественными тканями, что позволяет достигать нужных физиологических функций. При использовании пьезоэлектриков возможно создание чувствительной электромеханической системы преобразования. В связи с этим они применимы в областях, где доминирующей является механическая нагрузка, например, в костной или хрящевой ткани.

Имплантирование пьезоэлектрических материалов имеет большой потенциал для регенерации хрящевой ткани, что может привести к созданию новых методов инженерии хряща. Эти результаты могут стать отправной точкой для развития электротерапевтических стратегий для регенерации хрящевой ткани.

Для исследования инженерии тканей на основе пьезоэлектрических материалов необходимо детальное изучение взаимодействия между электрическими полями и физическими структурами пьезоэлектрических материалов. Например, материалы различной формы, такие как волокна, пленки и объемные структуры, могут обладать различными пьезоэлектрическими свойствами, поэтому важно понять соответствие между формой пьезоэлектриков и их биосовместимостью.

В будущем, использование пьезоэлектрических биоматериалов для создания имплантатов человеческого хряща может стать возможным благодаря хорошей совместимости с живыми организмами. Благодаря способности пьезо-

электрических материалов заживлять и регенерировать хрящ, появятся новые возможности для инженерии тканей.

Список литературы

1. Барбур К.Е., Хелмик К.Г, Скучно М., Брэди Т.Дж. Распространенность артрита, диагностированного врачом, и связанного с артритом ограничения активности. США, 2010-2012 гг. MMWR Морб. Смертный, еженедельно. 2013, 62. P. 869–873.

2. Хутман Дж.М., Хелмик К.Г. Прогнозы распространенности артрита в США и связанных с ним ограничений активности. Ревмирующий артрит. 2006, 54. P. 226–229.

3. Армиенто А.Р., Стоддарт М.Дж., Алини М., Эглин. Д. Биоматериалы для инженерии тканей суставного хряща: уроки биологии. Acta Biomater 2018, 65. P. 1–20.

4. Рохас-Мурильо Дж.А., Сименталь-Мендиа, Массачусетс, Монкада-Сауседо, Северная Каролина, Дельгадо-Гонсалес П., Ислас Дж.Ф., Роачо-Перес Х.А., Гарса-Тревиньо Э.Н. Физические, механические и биологические свойства фибриновых каркасов для восстановления хряща. Междунар. Дж. Мол. науч. 2022, 23. P. 9879.

5. Кришнан Ю., Гродзинский А.Я., Заболевания хрящей. Матрица. биол. 2018, 71. P. 51–69.

6. Чен С., Фу П., Ву Х., Пей М. Мениск, суставной хрящ и пульпозное ядро: сравнительный обзор хрящеподобных тканей по анатомии, развитию и функциям. Клетка. Ткань Res. 2017, 370. P. 53–70.

7. Гао Х., Пан В., Донг В., Яо Ю. Прогресс в костно-хрящевой регенерации с помощью инженерных стратегий. Анна. Биомед. англ. 2022, 50. P. 1232–1242.

8. Седман, младший, Родки В.Г., Бриггс К.К., Родриго Дж.Дж. Техника микропереломов в лечении полных дефектов хряща коленного сустава. Ортопад 1999, 28. Р. 26–32.

9. На Ю., Ши Ю., Лю В., Цзя Ю., Конг Л., Чжан Т., Хан К., Рен Ю. Является ли имплантация аутологичных хондроцитов более эффективной, чем микропереломы при дефектах суставно-хрящевой ткани коленного сустава? Систематический обзор данных 5-летнего наблюдения. Междунар. Дж. Сур. 2019, 68. Р. 56–62.

10. Гао Ю., Гао Дж., Ли Х., Ду Д., Джин Д., Чжэн М., Чжан К. Аутологичная трансплантация реберных хондр и имплантация реберных хондроцитов: новые хирургические методы. тер. Доп. Опорно-двигательный аппарат Дис. 2019, 11, 1759720X19877131.

11. Кристенсен В.В., Олесен М.Л., Хеде К.Т.С, Бергхольт Н.Л., Фолдагер С.В., Линд М. Хрящевые частицы для восстановления хондрального и остеохондрального суставов: обзор. Хрящ 2021, 13. Р. 1047–1057.

12. Гобби А., Bathan L. Биологические подходы к восстановлению хряща. Дж. Коленный хирург. 2009, 22.Р. 36–44.

13. Чжоу З., Куи Дж., Ву С., Гэн З., Су Дж. Биоматериалы на основе фиброина шелка для восстановления хрящей и костно-хрящевой ткани. Тераностика 2022, 12. Р. 5103–5124.

14. Андерсон Дж.А., Литтл Д., Тот А.П., Мурман Коннектикут, Такер В.С., Чиккотти М.Г., Guilak F. Терапия стволовыми клетками для восстановления коленного хряща: текущий статус доклинических и клинических исследований. Являюсь. Дж. Спорт. Мед. 2014, 42. Р. 2253–2261.

15. Пирсон Р.Г., Бхандари Р., Причуда Р.А., Шакешев К.М. Последние достижения в тканевой инженерии. J. Долгосрочный эффект. Мед. Имплантат. 2017, 27. Р. 199–231.

16. Чанг К., Бердик Дж.А. Инженерная хрящевая ткань. Доп. Лекарство. Делив. 2008 г., 60. Р. 243–262.

17. Ниу Х., Ли Н., Ду З., Ли Х. Интегрированные костно-хрящевые каркасы с градиентной тканевой инженерией: проблемы, текущие усилия и перспективы на будущее. *Биоакт. Матер.* 2023, 20. P. 574–597.

18. Хаусманс В.А.С., ванден Аккер G.G.H., Нифджес М., Тимур Юта, Кремерс А.Э, Пефферс М.Д., Кэрон М.М.Д., ван Рейн L.W., Эманс П.Дж., Бойманс Т.А.Е.Д. и другие. Прямое сравнение неостеоартритной и остеоартритной синовиальной жидкости, индуцированной внутриклеточной передачей сигналов хондроцитов и изменениями фенотипа. *Остеоартроз. Картил.* 2022, 31. P. 60–71.

References

1. Barbour K.E., Helmik K.G., Boring M., Brady T.J. Prevalence of Arthritis Diagnosed by Physician Associated Hyperactive Arthritis - United States, 2010-2012 *MMWR Morb. Mortal. weekly.* 2013, 62. P.869–873.

2. Hutman, J. M.; Helmik, K.G. Arthritis prevalence projections in the US are possible with activity limitations. *Rheumatic arthritis.* 2006, 54, 226–229.

3. Armiento, A.R.; Stoddart, M. J.; Alini, M.; Eglin, D. Biomaterials for Articular Cartilage Tissue Engineering: Lessons in Biology. *ActaBiomater* 2018, 65, 1–20.

4. Rojas-Murillo, J. A.; Simmental-Mendia, Massachusetts; Moncada-Saucedo, North Carolina; Delgado-Gonzalez, P.; Islas, J. F.; Roacho-Perez, J.A.; Garza-Trevino, E.N. Physical, mechanical and biological properties of fibrin scaffolds for cartilage repair. *International J. Mol. scientific* 2022, 23, 9879.

5. Krishnan, Y.; Grodzinsky, A.Ya. Cartilage diseases. *Matrix. biol.* 2018, 71, 51–69.

6. Chen, S.; Fu, P.; Wu, H.; Pei, M. Meniscus, articular cartilage and nucleus pulposus: a comparative review of cartilage-like tissues in anatomy, development, and function. *Cell. Fabric Res.* 2017, 370, 53–70.

7. Gao, H.; Pan, W.; Dong, W.; Yao, Yu. Progress in osteochondral grading with the help of engineering professionals. *Anna. Biomed. English* 2022, 50, 1232–1242.

8. Stedman, Jr.; Rodki, V.G.; Briggs, K.K.; Rodrigo, J.J. Technique of microfractures bypassing complete cartilage defects of the knee joint. *Ortopad* 1999, 28, 26–32.
9. Na, Yu.; Shi, Yu; Liu, W.; Jia, Yu; Kong, L.; Zhang, T.; Khan, K.; Ren Yu. Is the presence of autologous chondrocyte implantation more massive than microfractures in defects of the articular cartilage tissue of the knee joint? Systematic review of 5-year follow-up data. *International J. Sur.* 2019, 68, 56–62.
10. Gao, Y.; Gao, J.; Lee, H.; Du, D.; Jean, D.; Zheng, M.; Zhang, K. Autologous costal chondrule transplantation and costal chondrocyte implantation: new surgical techniques. *ter. Add. Musculoskeletal system Dis.* 2019, 11, 1759720X19877131.
11. Christensen, BB; Olesen, M.L.; Hede, CPC; Bergholt, N.L.; Foldager, KB; Lind, M. Cartilaginous particles for chondral and osteochondral joint repair: a review. *Cartilage* 2021, 13, 1047C–1057C.
12. Gobbi, A.; Bathan, L. Biological approaches to cartilage impingement. *J. Knee surgeon.* 2009, 22, 36–44.
13. Zhou, Z.; Kui, J.; Wu, S.; Geng, Z.; Su, J. Silk fibroin-based biomaterials for cartilage and bone cartilage repair. *Theranikika* 2022, 12, 5103–5124.
14. Anderson, J. A.; Little, D.; Toth, A.P.; Murman, Connecticut; Tucker, B.Sc.; Ciccotti, M. G.; Guilak, F. Stem cell therapy for knee cartilage repair: reaching the status of preclinical and emerging research. *I am. J. Sport. honey.* 2014, 42, 2253–2261.
15. Pearson R.G.; Bhandari, R.; Quirk, R. A.; Shakeshev, K.M. Recent advances in tissue engineering. *J. Long term effect. honey. Implant.* 2017, 27, 199–231.
16. Chang, K.; Burdick, J.A. Engineered cartilage. *Add. Medicine. Delive.* 2008, 60, 243–262.
17. Niu, H.; Lee, N.; Du, Z.; Lee, X. Integrated osteochondral scaffolds with gradient tissue engineering: challenges, current stresses, and future prospects. *Bioact. Mater.* 2023, 20, 574–597.

18. Housemans, B.A.C.; van den Akker, GGH; Niefges, M.; Timur, Utah; Kremers, A.; Peffers, M. J.; Caron, MMJ; van Rijn, LW; Emans, P. J.; Boymans, TAEJ; and others. Direct comparison of neo-osteoarthritic and osteoarthritic synovial fluid induced by intracellular chondrocyte signaling and phenotypic changes. *Osteoarthritis. Kartil.* 2022, 31, 60–71.

Отченашенко Александр Иванович – аспирант 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

ПЕРСОНАЛИИ

К 85-летию профессора Шмитько Евгения Ивановича



Шмитько Евгений Иванович 1938 г.р., доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, почетный строитель РФ отметил 15 мая 2023 года 85 лет.

В 1960 году он с отличием окончил Воронежский инженерно-строительный институт, получив квалификацию инженер-технолог по специальности «Производство бетонных и железобетонных изделий и конструкций для сборного строительства».

В 1965-1967 гг. Евгений Иванович обучался в очной аспирантуре Воронежского инженерно-строительного института. Защита кандидатской диссертации прошла успешно в МИСИ.

После окончания аспирантуры Евгений Иванович был направлен по распределению в Днепропетровский инженерно-строительный институт. Быстро вошел в исследовательский коллектив. Руководил несколькими эффективными разработками по линии Минсельстроя УССР, которые завершились широким внедрением. По части педагогической деятельности также достиг заметных

успехов: быстро прошел служебную «лестницу»: ассистент - доцент - заведующий кафедрой строительных материалов.

Но, несмотря на явные успехи и перспективы, не смог отказаться от приглашения родной кафедры вернуться в Воронеж. И с лета 1976 года Евгений Иванович Шмитко занял должность рядового доцента кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, с 1991 года стал заведующим кафедрой. В должности заведующего кафедрой Шмитко Е.И. успевал все: совершенствовать учебный процесс; разрабатывать новые образовательные программы; быстро реагировать на инновационную политику в образовании и науке; осуществлять связь с производством; готовить специалистов, бакалавров, магистров, аспирантов и многое другое.

В 1995 году Евгений Иванович защитил докторскую диссертацию, которая с удовлетворением была принята научной общественностью; в практические приложения вошли результаты промышленных внедрений на 14 предприятиях по производству сборного железобетона по всей России. Тема диссертации оказалась настолько плодотворной, что в ее створе прошла затем целая серия кандидатских и докторских диссертаций. Под руководством Евгения Ивановича защищены 10 кандидатских и 1 докторская диссертации.

За время многолетней работы в университете он проявил себя как высококвалифицированный специалист, опытный педагог и воспитатель, внесший значительный вклад в становление и совершенствование учебного процесса по направлению подготовки «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций». В течении 20 лет являлся основным организатором и председателем Всероссийской олимпиады студентов по специальности «Производство строительных изделий и конструкций».

В учебном процессе на высоком уровне разработал и освоил три новые учебные дисциплины и по которым написал и издал учебники («Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий», «Проектирование предприятий стройиндустрии», «Химия цемента и вяжущих веществ»), напол-

ненные практическим содержанием по курсовому и дипломному проектированию, лабораторному практикуму.

Шмитько Евгений Иванович является одним из основателей Воронежской научной школы в области строительного материаловедения и технологии строительных материалов. В области научных исследований раскрыл глубинную сущность роли воды на всех стадиях производства строительных изделий как структурообразующего, так и структуроразрушающего фактора.

В области практической науки результаты теоретических разработок внедрены более чем на 30 предприятиях Советского союза и Российской Федерации. Одно из внедрений было удостоено Государственной премии СССР.

Шмитько Е.И. автор более 300 научных и учебно-методических работ, патентов, в том числе 5 учебников, 3 из которых используются в других вузах, а один переведен на китайский язык.

За вклад в развитие образования и науки награжден знаком «За заслуги перед ВГАСУ», медалью «Ветеран труда».

В настоящее время Евгений Иванович продолжает активно заниматься образовательной и научной деятельностью, подготовкой магистрантов и аспирантов. Областью его научных интересов являются научно-практические основы управления химико-технологическими процессами структурообразования цементных систем с точки зрения физической и органической химии.

Дорогой Евгений Иванович!

От всей души поздравляем Вас с юбилеем. Здоровья Вам, творческого долголетия. Оставайтесь таким же оптимистичным, любознательным и вдумчивым человеком, каким мы Вас знаем!

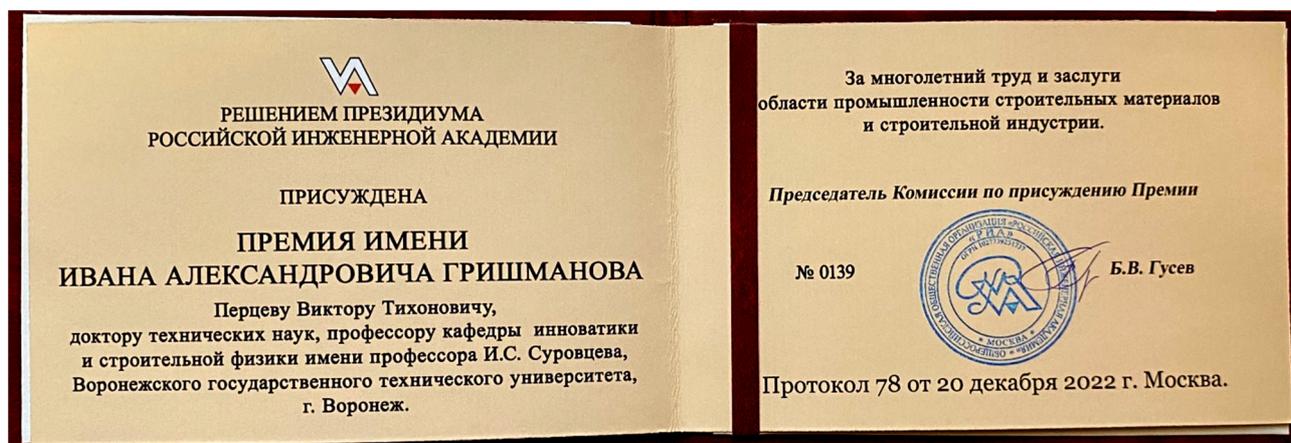
Усачев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

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

ХРОНИКА

Премия имени Гришманова И.А. присуждена профессору Перцеву В.Т.

Премия имени Гришманова И.А. по итогам 2022 года присуждена профессору Перцеву Виктору Тихоновичу, зам. главного редактора журнала «Химия, физика и механика материалов». Она присуждается Российской инженерной академией за достижения в области науки, техники и организации производства промышленности строительных материалов, конструкций и строительной индустрии.





Премия имени Гришманова И.А. учреждена для поощрения ученых и специалистов, внесших существенный вклад в науку, технику, организацию производства строительных материалов и конструкций.

Краткая биография Гришманова И.А. Родился 4 октября 1906 года в деревне Татариново Селижаровского района Тверской области в семье крестьянина. Трудовую деятельность начал в 1924 году плотником ремонтно-строительной конторы в г. Осташкове, затем работал на заводе им. Воровского в Ленинграде. В 1936 г. окончил Ленинградский институт инженеров коммунального строительства. Работал в строительных организациях Ленинграда прорабом, главным инженером. В 1944 г. назначен управляющим трестом «Псковстрой», затем руководил ленинградскими трестами «Ленкировотракторостой», «Кировстрой». 1949-1951 года он председатель Кировского райисполкома в Ленинграде, с 1951 по 1955 годы – первый заместитель Ленинградского горисполкома. В 1955 г. переведен в Москву на должность заведующего Отделом строительства ЦК КПСС, где проработал до 1961 года. С января 1961 года

– председатель Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства (Госстрой СССР). С января 1963 по 1965 года – председатель Государственного комитета по промышленности строительных материалов при Госстрое СССР, а с октября 1965 года – Министр промышленности строительных материалов СССР.

Гришманов И.А. большое внимание уделял развитию цементной промышленности, добивался ускоренного расширения отрасли, повышения ее технического уровня, создания условий для полного удовлетворения потребности народного хозяйства в цементе.

Премия присуждается работникам предприятий, объединений, организаций и учреждений промышленности строительных материалов и конструкций, строительной индустрии, проектных, научных и учебных заведений, имеющим стаж работы в отрасли не менее 10 лет, а также другим лицам, внесшим значительный вклад в развитие отрасли.

Редакционная коллегия Журнала ХФММ искренне поздравляют коллегу, лауреата данной премии Виктора Тихоновича Перцева и желает ему успехов в научной и педагогической деятельности.

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

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

Головинский Павел Абрамович – д-р физ.-мат. наук, профессор Воронежского государственного технического университета

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

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 2 (37), 2023

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 30.06.2023.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 16,3. Уч.-изд. л. 12,5.
Тираж 35 экз. Заказ №
Цена свободная*

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

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