



ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Воронежский государственный
технический университет

Химия, физика и механика
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск № 2(49), 2026

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

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

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

- ХИМИЯ
- ФИЗИКА
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
- ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
- ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ
- МЕХАНИКА

Выпуск № 2(49), 2026

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 (регистрационный номер 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

Ответственные секретари – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

канд. техн. наук, М.А. Шведова

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р хим. наук, проф. А.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 техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ); д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); канд. техн. наук, доц. А.А. Лукин (г. Челябинск, ЮУрГУ (НИУ)), 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. 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 хим. наук, доц. Е.В. Томина (г. Воронеж, ВГЛТУ); 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 биол. наук, проф. Н.Н. Харченко (г. Воронеж, ВГЛТУ); д-р хим. наук, проф. Н.В. Шелехова (г. Москва, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»); д-р техн. наук, проф. У.М. Турдалиев (Республика Узбекистан, АндМИ).

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

Издание рекомендуется специалистам по промышленному и гражданскому строительству, материаловедцам, 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, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, комн. 6420

тел.: +7(473)2717617, +7(980)5399928

E-mail: orudakov@cchgeu.ru

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Белькова Н.А., Лавлинская Т.В., Арзуманов А.А.* Разработка эффективных составов бетонных смесей для производства железобетонных конструкций..... 4
- Белькова Н.А., Струкова П.Н., Иващенко Е.И.* Пути повышения показателей качества и конкурентоспособности железобетонных колонн 15

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

- Рудаков Я.О., Шелехова Н.В., Рудаков О.Б., Кураева А.Е., Полянский К.К.* Газохроматографический метод для определения массовой концентрации летучих органических кислот в сложных многокомпонентных средах..... 30
- Пилицына А.В., Губин А.С., Санникова Н.Ю., Суханов П.Т.* Экстракционно-хроматографическое определение парабенов в водных средах..... 43
- Макеев А.И., Кукина О.Б., Кудоярова Э.Р., Малюков Д.Ю., Горбылёв М.А., Шпилевой Д.А.* Экспериментальные исследования свойств микро- и наноразмерных частиц природных алюмосиликатов..... 56
- Рудаков О.Б., Лукин А.А., Вебер А.Л.* Электрохимические методы идентификации микропластиков (часть 3)..... 72
- Хорохордина Е.А., Рудаков О.Б.* Экспресс-диагностика воздушной среды портативными детектирующими устройствами на содержание формальдегида и других летучих органических соединений..... 84

ЭКОЛОГИЯ

- Тепоян О.М., Колюкаева С.Г., Корнеева В.В.* Явление светового загрязнения. Часть 2 94

ПЕРСОНАЛИИ

- Рудаков О.Б., Белоногов Е.К., Куцев С.Б., Тураева Т.Л.* Памяти академика РАН Валентина Михайловича Иевлева..... 108

УДК 666.97

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Н.А. Белькова, Т.В. Лавлинская, А.А. Арзуманов

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

**Адрес для переписки: Белькова Наталья Анатольевна, e-mail: verlnata@mail.ru*

В работе приведены результаты разработки эффективных составов бетонных смесей, позволяющих не только экономить основные материальные ресурсы, но и утилизировать многотоннажные промышленные отходы, в частности сталеплавильные шлаки. Установлена взаимосвязь между видом добавки-наполнителя и реологическими характеристиками обводненной системы. В результате исследований были получены оптимальные расходы модифицирующих добавок. Установлено, что оптимальное количество замены цемента шлаком находится в пределах от 10...20 % (при минимальной потере прочности бетона), для добавки молотого песка – 5...10 %. При этом расход добавки-пластификатора, обеспечивающий заданные технологические свойства бетонной смеси, составляет 1,4 % от массы цемента.

Ключевые слова: сталеплавильный шлак, реологические свойства, водоредуцирующий эффект, предельное напряжение сдвига, прочность при сжатии.

**DEVELOPMENT OF EFFECTIVE COMPOSITIONS OF CONCRETE MIXTURES
FOR PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

N.A. Bel'kova, T.V. Lavlinskaya, A.A. Arzumanov

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

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

The paper presents the results of the development of effective compositions of concrete mixtures, allowing not only to save basic material resources, but also to dispose of multi-tonnage industrial waste, in particular steelmaking slags. A relationship has been established between the type of filler additive and the rheological characteristics of the watered system. As a result of research, optimal consumption of modifying additives was obtained. It has been established that the optimal amount of cement replacement with slag ranges from 10... 20% (with a minimum loss of concrete strength), for the addition of ground sand - 5... 10%. Note here that consumption of plasticizer that ensures preset process properties of concrete mix makes 1.4% of cement weight.

Keywords: steelmaking slag, rheological properties, water-reducing effect, ultimate shear stress, compressive strength

Введение

Проблема утилизации отходов промышленного производства в совокупности с вопросами экономии ресурсов при изготовлении железобетонных конструкций являются актуальными на всем протяжении их производства. Уже разработано достаточное количество способов решения этих вопросов, к которым относится и применение отходов промышленного производства в качестве компонентов бетонной смеси [1-6].

В зависимости от вида и крупности имеющихся отходов, возможны два основных вариантов их использования в тяжелых цементных бетонах: в качестве добавки, заменяющей часть цемента, либо в качестве самостоятельного или компонента композиционного заполнителя [3, 4]. Возможность экономии цемента, в данном случае, является наиболее интересным и экономически и экологически выгодным направлением, так как его производство является весьма энергозатратным процессом с выделением в атмосферу углекислого газа, на долю которого приходится около 5-8 % от общих мировых антропогенных выбросов CO₂ [6]. Основными добавками, используемыми для экономии цемента, являются: природные (молотые песок, известняк и т.п.) и техногенные (зола-унос, молотые шлаки и т.д.). Введение таких добавок, как зола-унос и молотый доменный шлак (согласно исследованиям [1, 6, 7]) приводит к изменению показателя удобоукладываемости

бетонной смеси (снижению величины осадки конуса), величина прочности бетона при оптимальных их расходах повышается.

Сталеплавильные шлаки представляют собой побочный продукт, образующийся при производстве стали, и характеризуются высоким содержанием CaO и MgO. Такие шлаки проявляют слабые гидравлические свойства из-за отсутствия в нем трехкальциевых силикатов (C_3S) и аморфного кремнезема (SiO_2). При этом, уровень замены портландцемента шлаками сталелитейного производства в вяжущем ограничены из-за их низкой гидравлической активности, а также проявления тенденций к самораспаду. Таким образом, можно сказать, что простая замена части портландцемента таким шлаком может привести к значительному снижению прочности бетона. Поэтому для эффективного использования такого шлака необходима дополнительная модификация бетона добавками поверхностно-активных веществ.

Исследованиями [9, 10] показано, что реологические свойства растворных и бетонных смесей определяют параметры технологических процессов в строительной индустрии. В частности, условия процессов перемешивания, транспортирования, формования и уплотнения, что, в конечном итоге, влияет на физико-технические характеристики готовых изделий и конструкций.

Целью настоящих исследований является разработка эффективных составов модифицированных цементных бетонов с применением минеральных и поверхностно-активных добавок.

Задачами исследований являются.

1. Проведение экспериментальных исследований по оценке реологических характеристик исследуемых систем.
2. Исследование влияния расхода минеральных добавок на показатели прочности цементного камня и бетона.
3. Анализ полученных результатов и получение оптимального состава тяжелого бетона для заводского изготовления ЖБК.

Экспериментальная часть

В исследованиях использовались следующие сырьевые материалы: цемент ЦЕМ I 42,5 (производства компании «ЦЕМРОС», Оскольского филиала), песок с модулем крупности 1,9; щебень из песчаника фракции 5-20 мм (ООО «ПавловскНеруд»). В качестве минеральных добавок использовались: молотый шлак – отход конвертерного производства Новолипецкого металлургического комбината и молотый песок. Химический состав шлака представлен в табл. 1, величина удельной поверхности составляла 490-500 м²/кг.

Таблица 1

Химический состав сталеплавильного производства НМЛК

MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	примеси
7,19	42,5	11,04	27,37	1,16	0,11	2,28	2,09	6,29

В качестве поверхностно-активного компонента использовалась добавка-гиперпластификатор «MC-POWERFLOW 7951» на поликарбоксилатной основе. Расход варьировался в пределах 0,3...2,5 % от массы цемента.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялись исследования реологических характеристик обводненных систем, с целью оптимизации расхода добавки-пластификатора при заданной удобоукладываемости. Реологические характеристики (предельное напряжение сдвига и эффективная вязкость) оценивались с помощью ротационного вискозиметра «РВ-4». На втором этапе исследований оценивались прочностные показатели цементного камня и бетона в зависимости от расхода наполнителя. Прочностные характеристики систем определялись на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982 с автоматической обработкой данных в «Bluehill Elements». Дозировка наполнителя составила 10, 20 и 30 % от массы цемента.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе были проведены исследования по оценке реологических характеристик модельных систем при постоянном значении удобоукладываемости (распыление конуса по Сутгарду) в зависимости от расхода добавки-пластификатора (таблица 2).

Влияние расхода добавки-пластификатора на реологические свойства обводненных систем (расплыв конуса по Суттарду составил 12...13 см)

Вид системы	Расход добавки, %	В/Т-отношение	Водоредуцирующий эффект, %	Предельное напряжение сдвига, τ_0 , Па	Минимальная эффективная вязкость, $\eta_{эфф\ min}$, Па·с
Цемент – вода	-	0,4	-	43,7	9,2
Молотый шлак – вода	-	0,35	-	25,8	10,3
Молотый песок-вода	-	0,35	-	20,8	8,1
Цемент – вода-добавка	0,3	0,33	17,5	33,6	12,8
Цемент – вода-добавка	1,4	0,24	40,0	20,3	29,4
Цемент – вода-добавка	2,5	0,21	47,5	15,8	31,4
Молотый шлак – вода-добавка	0,3	0,27	22,7	20,7	11,1
Молотый шлак – вода-добавка	1,4	0,20	42,9	10,7	19,5
Молотый шлак – вода-добавка	2,5	0,18	48,6	6,4	24,3
Молотый песок-вода-добавка	0,3	0,31	11,4	19,1	7,6
Молотый песок-вода-добавка	1,4	0,29	17,1	17,2	6,8
Молотый песок-вода-добавка	2,5	0,23	34,3	12,9	5,4

По полученным данным видно, что системы «цемент-вода» и системы «молотый шлак – вода» и «молотый песок-вода» отличаются по своим реологическим показателям. Так значения предельного напряжения сдвига для системы со шлаком и песком почти в два раза меньше, чем для цементной системы, что можно объяснить различиями в характеристиках твердой частицы: частицы наполнителей имеют более окатанную и ровную поверхность, что и обеспечивает взаимное их скольжение [8]. Такие различия в характеристиках частиц, отражаются и на поведении систем в присутствии пластифицирующей добавки. Для системы «цемент-вода» уже в присутствии минимальных количеств добавки-пластификатора наблюдается значительный (до 17 %) водоредуцирующий эффект, который постепенно увеличивается (до 47,5 %) с увеличением расхода

добавки ПАВ. Для системы «шлак-вода» при малых дозировках добавки-пластификатора значение водоредуцирующего эффекта составило более 22 %, что можно так же объяснить особенностями поверхности частиц шлака. Повышение расхода добавки-пластификатора до 1,4 % приводит к значительному росту водоредуцирующего эффекта – примерно в два раза (до 40 % и 42,9 % соответственно). Дальнейшее же повышение расхода добавки до 2,5 % снижает темпы роста величины водоредуцирующего эффекта, то есть можно говорить о достижении точки критической концентрации мицеллообразования и, как следствие, снижения эффективности действия добавки-пластификатора. Для системы «песок-вода» наблюдается несколько иная картина: при малых дозировках добавки-пластификатора водоредуцирующий эффект составил всего около 11 % и увеличился в три раза при достижении максимальных значений расхода добавки ПАВ. Это можно объяснить отличиями в природе поверхности зерен песка и цемента и шлака, в результате чего адсорбция молекул ПАВ происходит по-разному, что и отражается на разжижающем эффекте добавки.

Интересным в проведенных исследованиях является тот факт, что при повышении расхода добавки-пластификатора происходит постепенное снижение величины предельного напряжения сдвига: с 43,7 Па до 5,8 Па (для системы «цемент-вода») и с 25,8 Па до 6,4 Па (для системы «шлак-вода»). Однако, значения минимальной эффективной вязкости систем возрастают (10..12 до 24..30 Па·с) независимо от вида модельной системы. Это можно объяснить особенностями структуры молекул применяемой добавки-пластификатора: ПАВ на основе поликарбоксилатных эфиров содержат, помимо основной, еще и боковые полимерные цепи, которые за счет «стерического» отталкивающего эффекта обеспечивают высокую степень разжижения, но при внешних воздействиях эти цепи могут переплетаться. Это необходимо учитывать при определении технологических параметров процессов формования изделий. Для системы «песок-вода» подобный эффект не наблюдался: значения минимальной эффективной вязкости постепенно снижались с 8,1 Па·с (для системы без добавки) до 5,4 Па·с (при максимальном расходе добавки), что мы опять связываем с особенностями поверхности песка.

В таблице 3 представлены результаты исследования реологических характеристик систем при постоянном В/Т-отношении и оптимальном (1,4 % от массы твердой фазы) расходе добавки-пластификатора.

Таблица 3

Реологические характеристики модельных систем

Вид системы	В/Т-отношение	Расплыв по Сугтарду, см	Предельное напряжение сдвига, τ_0 , Па	Минимальная эффективная вязкость, $\eta_{эфф\ min}$, Па·с
«Цемент – вода»	0,32	0	156,9	22,1
«Молотый шлак – вода»	0,32	7	107,5	20,3
«Молотый песок-вода»	0,32	9	58,6	14,4
«Цемент – вода-добавка»	0,32	>30	1,6	15,3
«Молотый шлак – вода-добавка»	0,32	>30	1,5	38,1
«Молотый песок-вода-добавка»	0,32	>30	0,2	6,8

По полученным данным видно, что система «песок-вода» значительно отличается по своим реологическим характеристикам от двух других систем: она обладает более высокой текучестью (расплыв конуса составил 9 см даже в отсутствии добавки-пластификатора). Также для нее характерны низкие значения предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости. Все это говорит о меньшей стабильности системы, склонности к расслаиванию и водоотделению, что, безусловно, отразится на конечных свойствах материала.

На втором этапе исследований были получены данные по показателям прочности цементного камня и бетона (рисунок 1). Класс бетона при сжатии принят в соответствии с картой технологического процесса для производства изделий по кассетной технологии на ОА «Завод ЖБК» г. Воронеж - В25. По полученным данным видно, что введение шлака до 20 % в цементный камень приводит к медленному снижению его прочности (до 5...6 %), то есть можно говорить о проявлении шлаком гидравлических свойств. Дальнейшее повышение расхода шлака

приводит к значительному (до 30 %) снижению прочностных показателей.

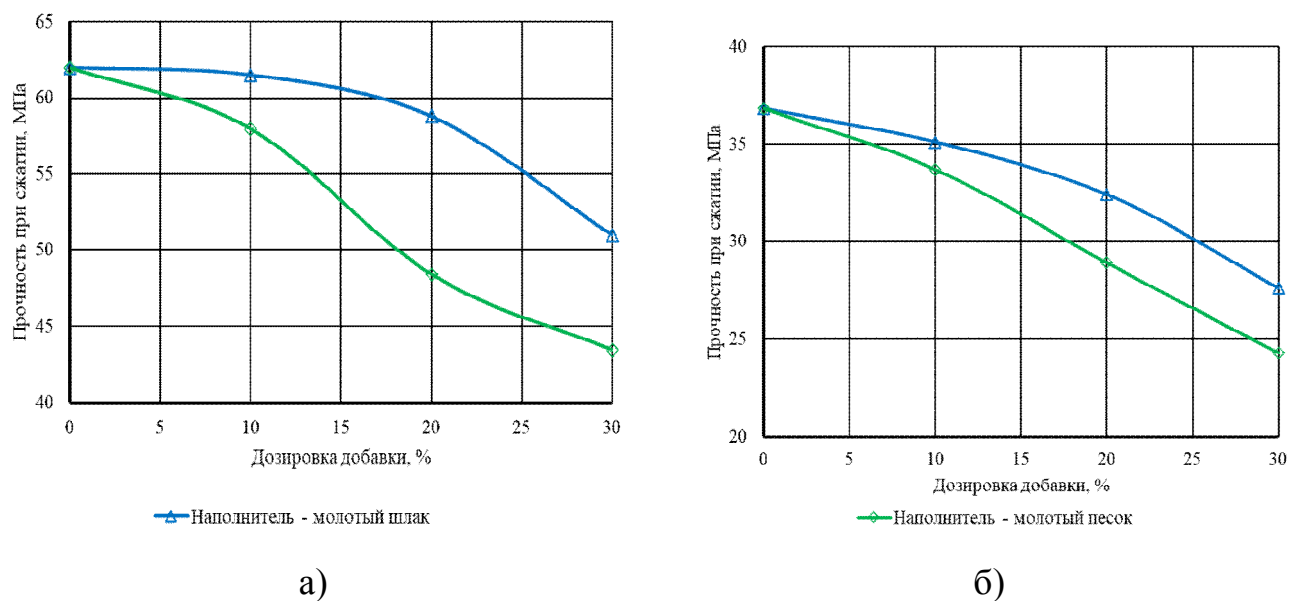


Рис. 1. Зависимости прочности цементного камня (а) и тяжелого бетона (б) от вида и расхода наполнителей

Введение в цементный камень молотого песка в количестве 10 % уже заметно (до 6...7 %) понижают его прочность. При дальнейшем разбавлении (расход песка 30 %) системы падение прочности значительно и составляет уже 30 %. В сравнении с системой со шлаком, для которой при расходе наполнителя 30 % падение прочности составило около 18 % (с 62 МПа до 51 МПа). Это еще раз подтверждает протекание реакций гидратации между компонентами шлака и цементного клинкера. Для тяжелого бетона полученные зависимости в целом сохраняются, особенно для бетона с молотым песком. При этом для бетона с наполнителем «молотый шлак» получено большее снижение прочности бетона по сравнению с цементным камнем. Так, при расходе шлака 20 % наблюдается большее снижение прочности: прочность снизилась с 36,8 до 32,4 МПа (примерно на 12 %). В целом можно сказать, что введение наполнителей в количестве 30 % от массы цемента не обеспечивает необходимое значение средней прочности (средняя прочность бетона при заданном классе должна составлять 31 МПа). Для наполнителя типа «молотый шлак» оптимальный расход находится в пределах 10...20 %, для «молотого песка» - 5...10 %.

Заключение

Исследована возможность использования наполнителей двух типов (молотых шлака конвертерного производства Новолипецкого металлургического комбината и песка кварцевого) в качестве добавок-модификаторов бетона. Проведена оценка реологических характеристик модельных систем «цемент-вода», «молотый песок-вода» и «молотый шлак-вода» с добавкой-гиперпластификатором на поликарбоксилатной основе и установлено, что для эффективного использования добавок-наполнителей необходимо учитывать свойства их поверхности. Наиболее экономически выгодной является добавка-наполнитель на основе шлака, так как ее максимально возможный расход составляет 20 % (без снижения требуемых характеристик бетона). Оптимальные дозировки наполнителей составляют: молотого шлака - 10...20 %, молотого песка – 5...10 % (при расходе добавки-пластификатора 1,4 %) и позволяют получить композит с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Дальнейшие исследования будут посвящены оптимизации составов по виду и расходу добавок ПАВ при заданных реологических характеристиках бетонной смеси.

Список литературы

1. Никора Н.И., Маилян А.Л., Рыженкова Д.Ю., и др. Сравнение эффективности модификации цементных бетонов золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 105–116.
2. Liu M., Liu H., Hua M., et al. Potential for recycling metakaolin/slag based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>.
3. Макаренко С.В., Лозовский Б.М., Хохряков О.В., и др. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 3(53). С. 39–46.

4. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А, и др. Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. № 5(109). С. 132–147.
5. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. 2024. № 2(1177). С. 85–88.
6. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н. Ресурсоориентированная технология получения строительных материалов на основе сталеплавильного шлака // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 2(59). С. 53-59.
7. Yang Q., Wang H., Zeng L., et al. Properties of High-Content Micro-Steel Fiber Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Slag Powder Performance Study // Constr. Mater. 2023. № 3. P. 558–575
8. Леденев А.А., Перцев В.Т., Рудаков О.Б., и др. Развитие представлений о реологическом поведении строительных смесей с учетом фрактально-кластерных процессов при их структурообразовании // Конденсированные среды и межфазные границы. 2020. Т. 22, № 4. С. 473-480.
9. Ахматов М.К., Кочергина М.П., Тимохин Д.К., и др. Исследование реологических свойства цементных композиций с комплексом добавок // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11(107). С. 550–561
10. Ахвердиева Т.А., Джафаров Р. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона // Строительные материалы. 2019. No 3. С. 73-76. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76>

Reference

1. Nikora N.I., Mayilyan A.L., Ryzhenkova D.Yu., et al. Comparison of efficiency of cement concrete modification with fly ash and ground blast-furnace granulated slag // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2025. No. 2(63). P. 105-116. (in Russian)
2. Liu M., Liu H., Hua M., et al. Potential for recycling metakaolin/slag based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions // Materials [Internet]. 2024. V. 17. P. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>.

3. Makarenko S.V., Lozovsky B.M., Khokhryakov O.V., et al. The influence of active pozzolan fillers on the properties of fine-grained cement concrete // *Izvestia of the Kazan State University of Architecture and Construction*. 2020. No. 3(53). P. 39-46. (in Russian)
4. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A., et al. Fly ash in the production of concretes for various purposes and dry building mixtures // *Construction and reconstruction*. 2023. No. 5(109). P. 132-147. (in Russian)
5. Astafieva O.E. Use of ash and slag waste in the construction materials industry // *Coal*. 2024. No. 2(1177). P. 85-88.
6. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N. Resource-oriented technology for obtaining building materials based on steelmaking slag // *Regional architecture and construction*. 2024. No. 2(59). P. 53-59. (in Russian)
7. Yang Q., Wang H., Zeng L., et al. Properties of High-Content Micro-Steel Fiber Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Slag Powder Performance Study // *Constr. Mater.* 2023. No. 3. P. 558–575
8. Ledenev A.A., Pertsev V.T., Rudakov O.B., et al. The development of ideas about the rheological behavior of building mixtures with the study of fractal-cluster processes during their structure formation // *Condensed media and interphase boundaries*. 2020. V. 22. No. 4. P. 473-480. (in Russian)
9. Akhmatov M.K., Kochergina M.P., Timokhin D.K., et al. Study of the rheological properties of cement compositions with a complex of additives // *Engineering Bulletin of Don*. 2023. No. 11(107). P. 550-561. (in Russian)
10. Akhverdiyeva T.A., Dzhafarov R. Influence of finely ground mineral additives on concrete properties // *Building materials*. 2019. No 3. P. 73-76. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76>

Белькова Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, ВГТУ

Лавлинская Татьяна Владимировна – студент группы мТРП-211, строительный факультет, ВГТУ

Арзуманов Арбен Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии, организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью, ВГТУ

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Н.А. Белькова, П.Н. Струкова, Е.И. Иващенко

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

**Адрес для переписки: Белькова Наталья Анатольевна, e-mail: verlnata@mail.ru*

Железобетонные конструкции в целом, и колонны в частности, являются востребованными элементами при возведении зданий различного назначения. Поэтому поиск путей повышения их качества, как по техническим, так и по экономическим параметрам, является актуальным. В данной работе проведены исследования возможности снижения материалоемкости и энергоемкости технологии производства колонн за счет применения комплексных добавок-модификаторов. Установлено, что применение добавок «Оптима-гранд Т30» и «Криопласт ПК» в количестве 0,6...1 % от массы цемента позволяет не только повысить среднюю прочность при сжатии бетона и, тем самым, снизить расход цемента, но и исключить этап тепло-влажностной обработки из общей технологии производства колонн. Так же показано, что наиболее конкурентоспособным является состав, содержащий 1 % добавки «Оптима-гранд Т30».

Ключевые слова: железобетонные колонны, комплексные добавки-модификаторы, кинетика твердения, конкурентоспособность.

WAYS TO IMPROVE QUALITY INDICATORS AND COMPETITIVENESS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

N.A. Bel'kova, P.N. Strukova, E.I. Ivashchenko

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

**Corresponding author: Natalya A. Belkova, e-mail: verlnata@mail.ru*

Reinforced concrete structures in general, and columns in particular, are in demand elements in the construction of buildings for various purposes. Therefore, the search for ways to improve their quality, both in technical and economic parameters, is actual. This paper studies the possibility of reducing the material and energy consumption of the column production technology due to the use of complex additives-modifiers. It was established that the use of additives "Optima-grand T30" and "Cryoplast PK" in the amount of 0.6... 1% of the weight of cement allows not only to increase the average compressive strength of concrete and, thereby, reduce cement consumption, but also to exclude the stage of heat and humidity treatment from the general technology of column production. It is also shown that the most competitive is the composition containing 1% of the "Optima-grand T30" additive.

Keywords: reinforced concrete columns, complex additives-modifiers, hardening kinetics, concentricity

Введение

Сборные железобетонные колонны используются при возведении как одноэтажных, так и многоэтажных зданий, различного назначения. За счет правильно подобранных характеристик данный тип конструкций позволяет распределить нагрузку между основными элементами каркаса здания. При этом данная конструкция производится на большом количестве предприятий строительной отрасли, в связи с чем и возникают вопросы, касающиеся поиска путей повышения ее качества и конкурентоспособности [1].

Основными направлениями повышения качества продукции, в целом, являются не только способы улучшения ее основных свойств, но и возможность снижения материальных и энергозатрат на ее производство.

Если рассматривать в качестве объекта исследований железобетонную колонну, то основными показателями ее качества являются несущая способность и прочность конструкции, которые задаются в проектной и нормативной документации. Так же к основным показателям относится и качество ее поверхности. Согласно нормативным документам требования к внешнему виду колонн качество поверхности должно соответствовать категориям А3 и А7. Однако в современных

условиях очень часто заказчики в договорах повышают категорию поверхности до А2 – это поверхность, подготовленная под окраску (без дополнительной отделки на строительной площадке). То есть на поверхности колонн должны отсутствовать дефекты в виде пор, трещин и недоуплотнений, которые к тому же оказывают значительное влияние и на несущую способность.

Целью настоящих исследований является разработка путей повышения конкурентоспособности железобетонных колонн.

Задачами исследований являются.

- Выявить основные технологические параметры и факторы, влияющие на качество готового продукта и определить пути решения проблемы.
- Исследовать влияние вида и расхода добавок-модификаторов на показатели прочности бетона для колонн.
- Провести анализ полученных результатов и оценить конкурентоспособность полученных составов.

Для выявления основных параметров и переделов технологический процесс производства колонн был проанализирован с помощью инструмента качества диаграммы Исикава, представленной на рисунке 1. На диаграмме мы можем выделить критические точки и переделы производства колонны, которые будут иметь наибольшее влияние на качество готового продукта.

1. Характеристики сырьевых материалов, в частности:

- цемента (все основные показатели);
- арматура (предел прочности при разрыве);
- песка (модуль крупности и содержание глинистых частиц);
- щебня (фракционный состав, прочность, содержание зёрен пластинчатой формы);
- добавки (все основные показатели).

2. Характеристики технологии:

- параметры формования и уплотнения бетонной смеси;
- качество сварки арматурных изделий;
- состав и живучесть бетонной смеси;

- время приготовления бетонной смеси;
 - качество смазки (вид смазочных составов, правильность нанесения).
3. Характеристики оборудования:
- параметры вибратора.
4. Персонал:
- квалификация.
5. Методы контроля:
- характеристики средства измерений.

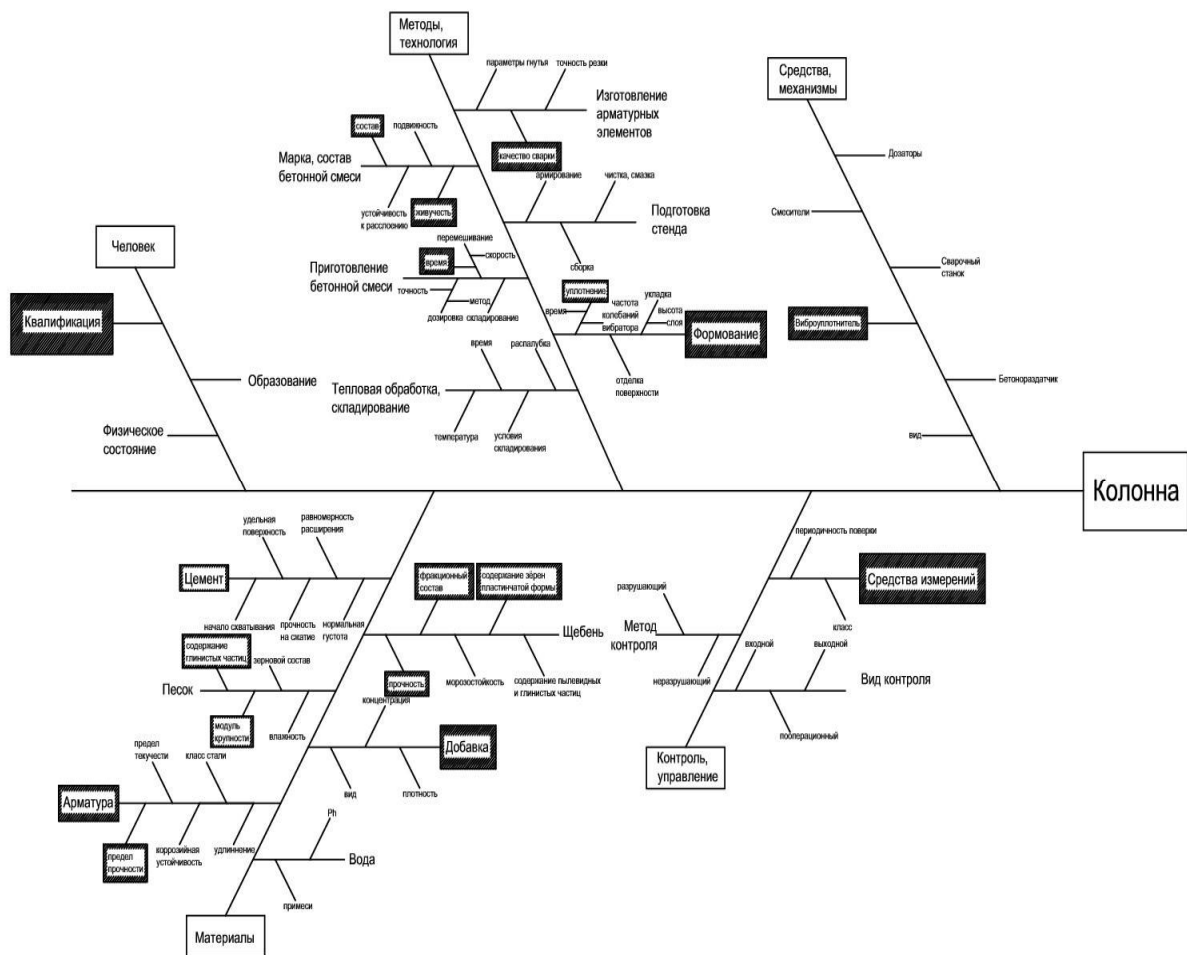


Рис. 1. Диаграмма Исикавы для процесса производства железобетонных колонн

Поэтому первым направлением улучшения качества колонн является обеспечение необходимых параметров технологии, исключающих эти дефекты.

Вторым направлением возможно использование технологических приемов, позволяющих снизить материало- и энергоемкость их производства.

Одним из приемов решения поставленной задачи является использование добавок – модификаторов, применение которых позволяет не только улучшать качество поверхности и повышать прочностные свойства бетона, но и снизить материальные затраты (за счет снижения расхода цемента) и энергетические затраты на процессы уплотнения и тепловой обработки [2-6].

Ускорение процесса твердения бетона возможно путем создания благоприятных условий прохождения всех основных этапов твердения цементного камня. Значительный эффект достигается за счет комплексного воздействия добавок-модификаторов на процессы схватывания и набора прочности цементного камня и бетона в целом.

Так, в исследованиях [7] показано, что при дозировке добавки Master Rheobuild 3000P в 1% от массы портландцемента, образцы, после 8-ми часов с момента приготовления бетонной смеси, стали показывать большую скорость твердения и набора прочности по сравнению с контрольными образцами без добавки.

Исследованиями [8-10] установлено, что введение добавок пластифицирующего действия позволяет увеличить прочность изделия, его водонепроницаемость и морозостойкость, а также возрастает подвижность самой смеси, что обеспечивает лучшее сцепление ее с арматурой. Вместе с тем, уменьшение количества воды затворения способствует быстрому образованию концентрированного раствора, в котором кристаллизация происходит лучше, что сокращает время схватывания и твердения.

При этом многочисленные исследования показали, что наиболее эффективными являются добавки на основе поликарбоксилатных эфиров.

Экспериментальная часть

В исследованиях использовались следующие сырьевые материалы: цемент ЦЕМ I 42,5 (производства компании «ЦЕМРОС», Оскольского филиала), песок с модулем крупности 1,9; щебень из песчаника фракции 5-20 мм (ООО

«ПавловскНеруд»). В качестве добавок использовались добавки Sika® Antifreeze LS и «Оптима-гранд Т.30» (таблица 1). Класс бетона принят в соответствии проектными требованиями для колонн серии 1.020-1/83 - В25, подвижность бетонной смеси П2. Расходы добавок варьировались в пределах 0,3...1 % (0,3; 0,6; 1% от массы цемента), включая контрольные образцы без добавок. Факторное пространство исследований представлено в таблице 2. Сроки твердения составили 1, 3, 7 и 28 суток.

Таблица 1

Характеристика, использованных в исследованиях, добавок

Характеристики	«Оптима-гранд Т.30»	Криопласт ПК
Основа	Эфир поликарбоксилатов	Эфир поликарбоксилатов
Внешний вид	Однородная жидкость от белого до желтого цвета	Жидкость от светло-желтого до коричневого цвета
Плотность	(1040-1080) кг/м ³ (при +20°С)	1150 кг/м ³ (при +20°С)
Показатель pH	6±2	4,5
Содержание Cl-иона, в масс. % не более	0,1	0,04
Дозировка	(0,2-2,0) % от массы цемента	(0,3-2,0) % от массы цемента

Таблица 2

Факторное пространство исследований

№ серии	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Добавка Оптима-гранд Т30, л	Добавка Криопласт ПК, л
1	375	720	1100	-	-
2	375	720	1100	1,125	-
3	375	720	1100	2,25	-
4	375	720	1100	3,75	-
5	375	720	1100	-	1,125
6	375	720	1100	-	2,25
7	375	720	1100	-	3,75

Исследования проводились в три этапа. На первом этапе осуществлялись исследования водоредуцирующего эффекта добавок. На втором этапе исследований оценивались кинетика набора прочности бетона в зависимости от вида и расхода добавки. Прочностные характеристики систем определялись на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982 с автоматической обработкой данных в «Bluehill Elements». На третьем этапе исследований осу-

ществлялась оценка конкурентоспособности разработанных составов тяжелых бетонов для колонн.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований были проведены экспериментальные исследования по оценке водоредуцирующего эффекта добавок по показателю нормальной плотности цементного теста (рисунок 2).

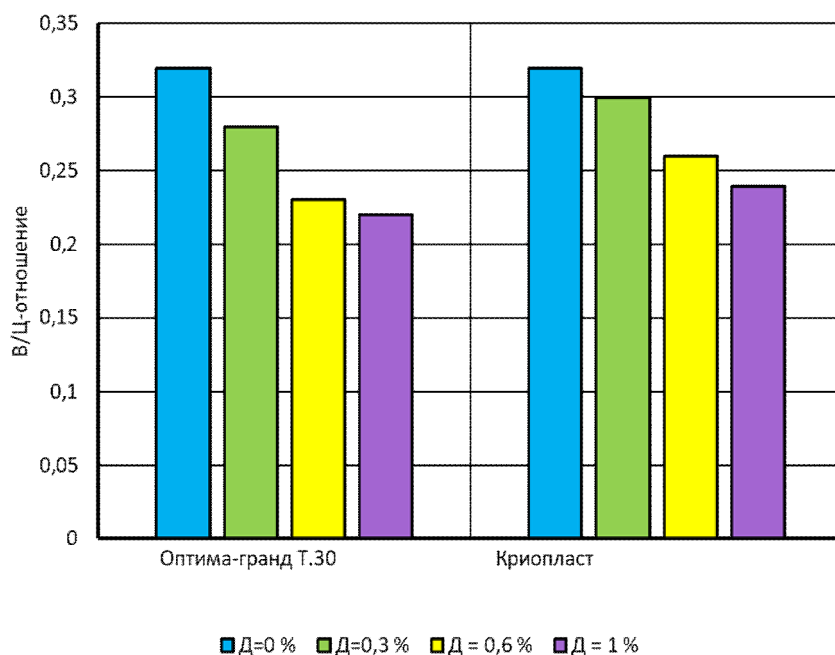


Рис. 2. Влияние вида и расхода добавки на В/Ц-отношение нормальной плотности цементного теста

По данным, представленным на рисунке 2 видно, что добавка «Оптим-гранд Т30» обладает лучшим водоредуцирующим эффектом: максимальное снижение В/Ц-отношения составило более 30 % (с 0,32 для эталонной системы без добавки до 0,22 – для максимального расхода добавки). Для цементного теста с добавкой «Криопласт ПК» этот показатель снизился на 25 % (до 0,24 при том же расходе добавки). Это можно объяснить отличиями в вещественном составе добавок. Хотя поверхностно-активной основой обеих добавок являются поликарбоксилатные эфиры, однако структура полимерных молекул может отличаться. В частности, производители добавок варьируют такие структурные

компоненты молекул, как длина и количество боковых цепей, плотность карбоксильных групп, а также дополнительные функциональные группы, что и отражается в эффективности их действия. Помимо поверхностно-активного компонента в обе добавки входит и ускоритель твердения, который также отличается по виду и количеству. Все это и находит отражение в полученных данных.

На втором этапе исследований вначале изучалось влияние расхода добавок на прочностные показатели бетона в возрасте 28 суток (рисунок 3). Исследования проводились на равноподвижных смесях.

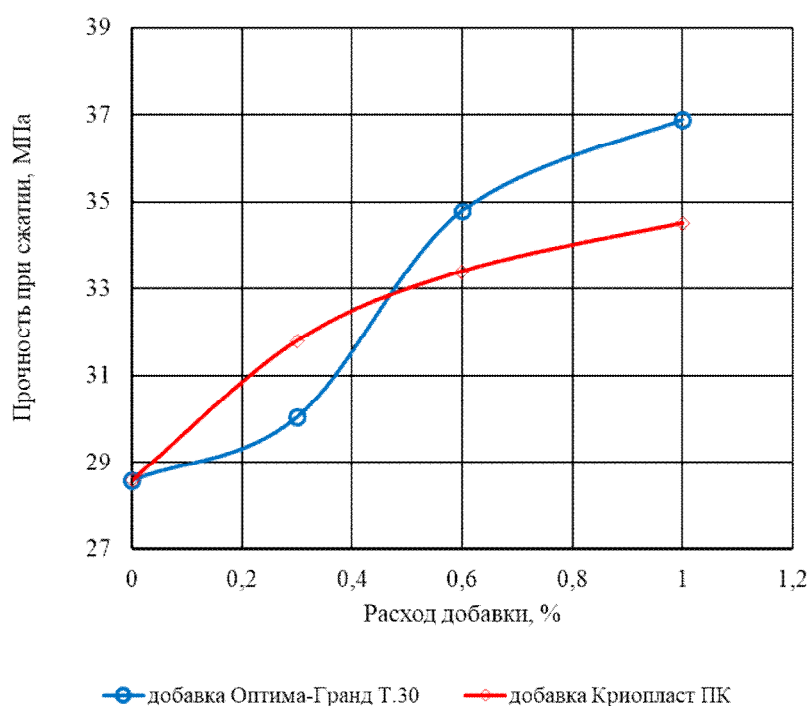


Рис. 3. Зависимость прочности бетона от вида и расхода добавок в возрасте 28 суток

По полученным данным видно, что при расходе добавок 0,3 % от массы цемента наиболее эффективной является добавка «Криопласт ПК»: прочность при сжатии повысилась примерно на 15 % относительно эталона. Для бетона с добавкой «Оптима-гранд Т30» изменение прочности составило всего 5 % (что фактически находится в пределах ошибки опыта и не является значимым). При повышении расхода добавок до 0,6 % эти изменения становятся более значимыми: прочность увеличивается на 20...25 % относительно эталона без добав-

ки. Наиболее значительное повышение прочности бетона получено при расходе добавок 1 %: с 28,5 МПа для эталона до 34...37 МПа для бетона с добавками. При этом отличия в прочностных показателях для бетонов с различными добавками не так и велики. Таким образом, можно сказать, что оптимальные расходы добавок находятся в пределах 0,6...1 %.

Наиболее интересные результаты получены нами при исследовании кинетики твердения бетона с добавками (рисунок 4).

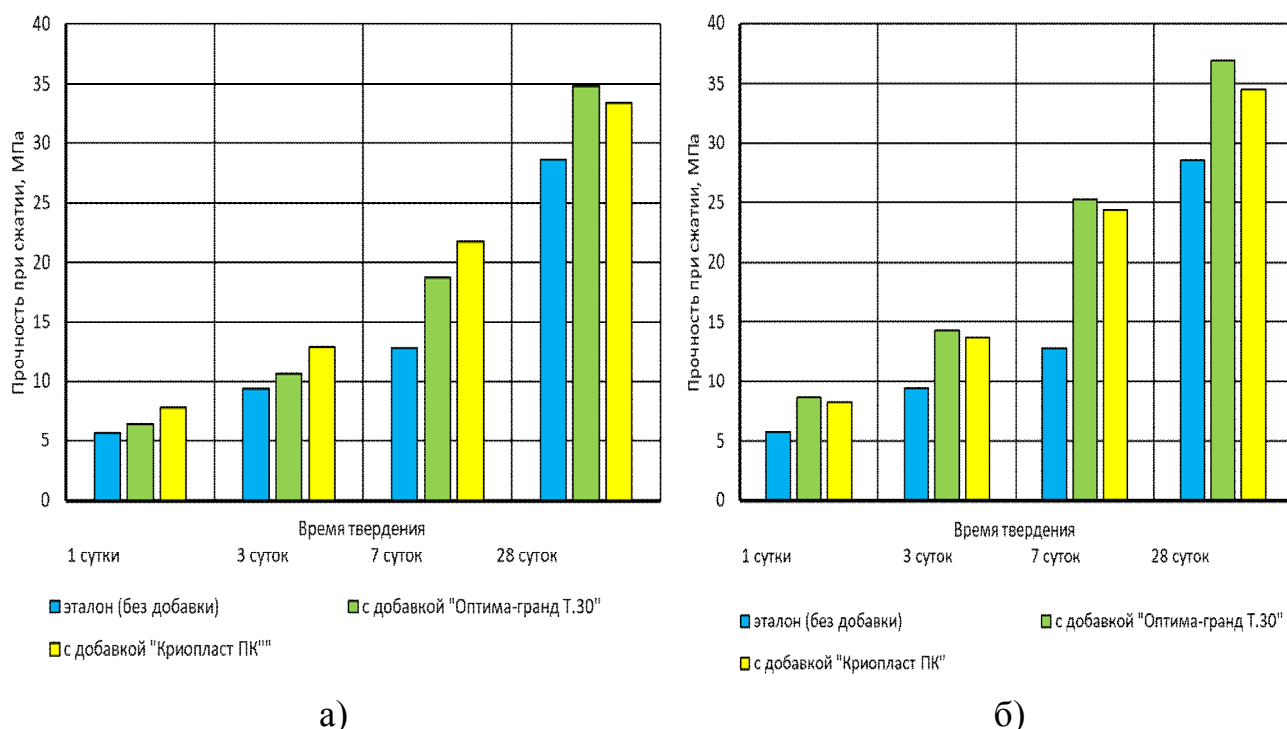


Рис. 4. Зависимости прочности бетона от вида и расхода добавок и сроков твердения:

а) расход добавок 0,6 % от массы цемента; б) расход добавок 1 % от массы цемента

В ранние сроки твердения (1 и 3 суток) при расходе добавок 0,6 % прочность бетона возрастает на 15...30 % относительно бетона без добавок (например, с 9,5 МПа для эталона до 13 МПа для бетона с добавкой «Криопласт ПК») и фактически составляет 50 % от заданной отпускной прочности. Полная отпускная прочность колонн, согласно нормативным требованиям, составляет 70 % от класса бетона при сжатии (17,5...18,5 МПа) и достигается к возрасту 7 суток.

При расходе добавок 1 % наблюдается более интенсивные темпы набора прочности: так прочность бетона в возрасте 3 суток составляет около 14 МПа не

зависимо от вида добавки, то есть можно предположить, что к четвертым суткам твердения будет достигнута отпускная прочность бетона. Это подтверждается данными, полученными в возрасте 7 суток: прочность бетона составила 25 МПа.

При этом в исследованиях проводилась визуальная оценка качества поверхности образцов по показателю наибольшего размера раковин на поверхности и высоте местного наплыва (выступа) или глубине впадины (таблица 3).

Таблица 3

Количество и размеры дефектов на поверхности образцов

№ серии	Наибольший размер раковины на поверхности, мм	Высота местного наплыва (выступа) или глубина впадины, мм	Среднее количество дефектов на 5 гранях образца, шт.
1	10,2	3,2	8,6
2	7,5	2,35	5,4
3	4,8	1,46	3,8
4	3,12	0,88	3,2
5	8,1	2,73	6,5
6	5,3	1,84	4,9
7	3,05	0,96	3,1

Как видно по данным, представленным в таблице 3, видно, что введение добавок-модификаторов значительно улучшает качество поверхности образцов. При этом, добавка «Оптима-гранд Т30» действует несколько лучше, чем добавка «Криопласт ПК», что отразилось как в размерах, так и в количестве наблюдаемых дефектов.

В целом можно сказать, что введение предложенных добавок положительно влияет на показатели качества бетона для колонн. Оптимальные дозировки добавок находятся в пределах 0,6...1 % от массы цемента. Окончательное решение о типе расходе добавок возможно принять на основе оценки конкурентоспособности разработанных составов. Данные исследования проводились по методике, предложенной И.И Акуловой [12], основанной на расчете относительного показателя конкурентоспособности строительных материалов различного качества. Согласно данной методике, на первом этапе был сформирован перечень основных свойств железобетонных колонн, в который входили: прочность при сжатии, мо-

роустойкость, точность размеров и качество поверхности. После проведения анкетирования и оценки значимости выделенных свойств (рисунок 5) установлено, что наиболее важными для потребителя являются показатели прочность бетона при сжатии и показатели качества поверхности.

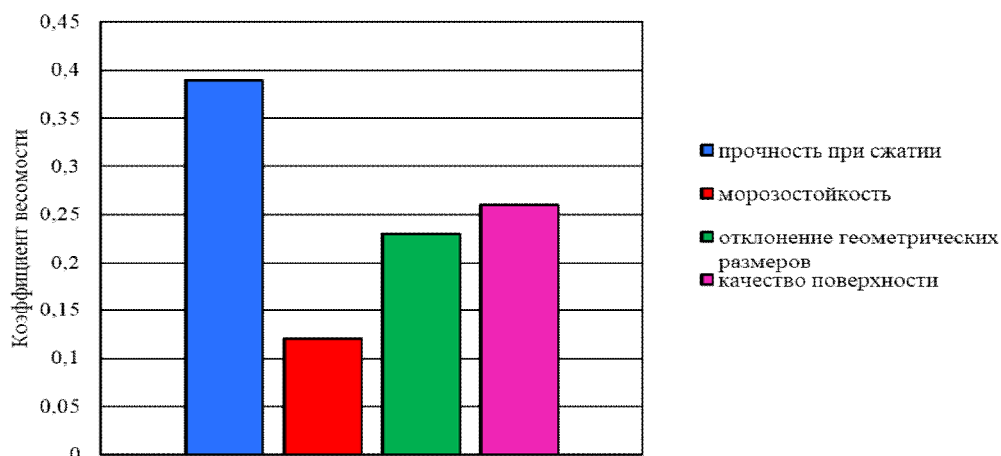
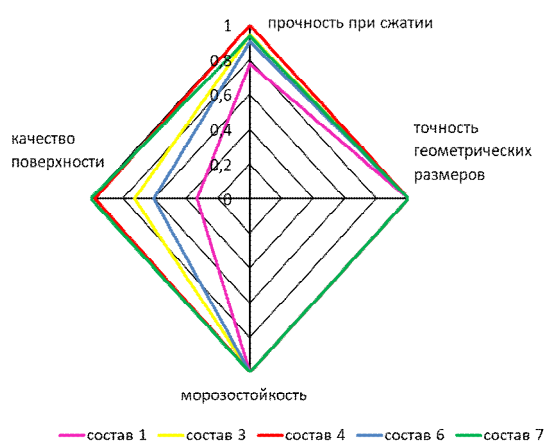
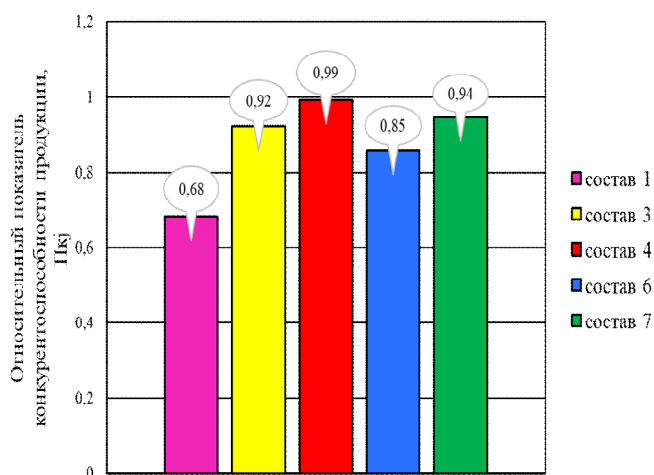


Рис. 5. Результаты расчета значимости функциональных свойств железобетонных колонн

Далее осуществлялся расчет единичных показателей конкурентоспособности по потребительским свойствам (рис. 6, а) и относительного показателя конкурентоспособности разработанных составов (рис. 6, б).



а)



б)

Рис. 6. Результаты оценки конкурентоспособности разработанных составов: а) единичные показатели конкурентоспособности по потребительским свойствам; б) относительный показатель конкурентоспособности продукции

По полученным данным видно, что наиболее конкурентоспособным как по единичным показателям, так и по относительному показателю конкурентоспособности является состав № 4 (с добавкой «Оптима-гранд Т30»): относительный показатель составляет 0,99. Наиболее близким к нему является состав № 7 с добавкой «Криопласт ПК» с относительным показателем конкурентоспособности 0,94.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что использование добавок-модификаторов на основе пластифицирующего и ускоряющего процессы твердения бетона компонентов является эффективным инструментом, повышающим качество железобетонных конструкций. Использование добавок «Оптима-гранд Т30» и «Криопласт ПК» в количестве 0,6...1 % от массы цемента позволяет не только увеличить прочность бетона и, как следствие, обеспечить снижение материалоемкости продукции в результате снижения расхода цемента, но и снизить энергоемкость производства за счет исключения этапа тепло-влажностной обработки. Также в исследованиях была опробована методика оптимизации составов бетона по виду и расходу добавок на основе оценки их конкурентоспособности, что позволяет учитывать не только технологические параметры улучшения качества, но и экономическую составляющую. Дальнейшие исследования будут направлены на детальное изучение всего спектра свойств бетона и конструкций из него.

Список литературы

1. Молчанова Р. В. Инновационные технологии в строительстве // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 3, N 5 (137). С. 136-141.
2. Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Швецова В.А., и др. Влияние комплексных добавок на прочность цементного камня в раннем возрасте // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 5. С. 52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59.

3. Анощенко Н.П., Анощенко Е.А., Суханов А.М., и др. Пути увеличения скорости твердения бетона на ранней стадии // Инновации и современные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: сборник статей по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Курган, 20 января 2022 года. Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2022. С. 356-361.

4. Иванова О.В., Глазачев А.О., Халиков Р.М., и др. Супрамакромолекулярное формирование наноструктуры геополимерных композитов с использованием золошлаковых отходов // Проблемы развития современного общества: Сборник научных статей 11-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. В 4-х томах, Курск, 19–20 января 2026 г. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2026. С. 210-213.

5. Yamada K., et al. Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer // Cement and Concrete Research. 2000. V. 30, No 2. P. 197–207. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00230

6. Бахташ К.Н., Абдрахманов У.К. Исследование возможности повышения качества бетона введением модифицирующих добавок // Молодой ученый. 2020. № 22 (312). С. 91-94.

7. Kermani S., Khalatbari S. Enhancing Concrete Strength with Polymer-Based Additives in the Cement Matrix: A Comprehensive Review // Journal of Civil Engineering Researchers. 2024. V. 6(1). P.48-64.

8. Ледяйкина О.В., Ледяйкин Н.В. Исследование влияния модифицирующих добавок на свойства бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 4. С. 8-15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-15.

9. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., и др. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 21-25.

10. Abdikerova U., Abilbek Z., Shegenbayev A., et al. Study of the influence of chemical additives on the properties of fine-grained concrete / *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2022. V. 17. No. 15. P.1488-1494.

11. Лангнер Е.А., Шиховцов А.А., Царев А.А., и др. Современные технологии ускорения набора прочности бетона // *Вестник евразийской науки*. 2020. Т. 12, № 5. С. 36.

12. Славчева Г.С., Акулова И.И. Определение первоочередных направлений повышения качества и конкурентоспособности строительных материалов: методика и алгоритм // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 56-60. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-56-60

Reference

1. Molchanova R.V. Innovative technologies in construction // *Economics and management: problems, solutions*. 2023. V. 3. No. 5 (137). P. 136-141. (in Russian)

2. Lam N.Z.T., Samchenko S.V., Shvetsova V.A., et al. The influence of complex additives on the strength of cement stone at an early age // *Industrial and civil construction*. 2023. No. 5. P. 52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59. (in Russian)

3. Anoshchenko N.P., Anoshchenko E.A., Sukhanov A.M., et al. Ways to increase the rate of concrete hardening at an early stage // *Innovations and modern technologies in the production and processing of agricultural products: a collection of articles based on materials from the All-Russian (national) scientific and practical conference, Kurgan, January 20, 2022*. Kurgan: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, 2022. P. 356-361. (in Russian)

4. Ivanova O.V., Glazachev A.O., Khalikov R.M., et al. Supramacromolecular formation of the nanostructure of geopolymer composites using ash and slag waste // *Problems of the development of modern society: Collection of scientific articles of the 11th All-Russian National Scientific and Practical Conference*. In 4 volumes, Kursk, January 19-20, 2026. Kursk: University Book CJSC, 2026. P. 210-213. (in Russian)

5. Yamada K., et al. Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer // Cement and Concrete Research. 2000. V. 30, No 2. P. 197–207. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00230.
6. Bakhtash K.N., Abdrakhmanov U.K. Study of the possibility of improving the quality of concrete by adding modifying additives // Young scientist. 2020. No. 22 (312). P. 91-94. (in Russian)
7. Kermani S., Khalatbari S. Enhancing Concrete Strength with Polymer-Based Additives in the Cement Matrix: A Comprehensive Review // Journal of Civil Engineering Researchers. 2024. V. 6(1). 2024. P.48-64. (in Russian)
8. Ledyikin O.V., Ledyikin N.V. Study of the effect of modifying additives on the properties of concrete // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. № 4. P. 8-15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-15 (in Russian)
9. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., et al. Modern superplasticizers for concrete, features of their application and effectiveness // Building materials. 2016. No. 11. P. 21-25. (in Russian)
10. Abdikerova U., Abilbek Z., Shegenbayev A., et al. Study of the influence of chemical additives on the properties of fine-grained concrete // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2022. V. 17. No. 15. P.1488-1494.
11. Langner E.A., Shikhovtsov A.A., Tsarev A.A., et al. Modern technologies for accelerating concrete strength gain // Bulletin of Eurasian Science. 2020. V. 12. No. 5. P. 36. (in Russian)
12. Slavcheva G.S., Akulova I.I. Determination of priority areas for improving the quality and competitiveness of building materials: methodology and algorithm // Building materials. 2022. No. 3. P. 56-60. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-56-60. (in Russian)

Белькова Наталья Анатольевна - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, ВГТУ

Струкова Полина Николаевна – студент группы мЭКСМ-241, строительный факультет, ВГТУ

Иващенко Елена Ивановна - канд. техн. наук, доцент кафедры графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, ВГТУ

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

УДК 543.544

**ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ
В СЛОЖНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ**

Я.О. Рудаков¹, Н.В. Шелехова², О.Б. Рудаков¹, А.Е. Кураева¹, К.К. Полянский³

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

²ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», Москва

³Воронежский филиал Российского экономического университета, Воронеж

**Адрес для переписки: Рудаков Ярослав Олегович, e-mail: orudakov@cchgeu.ru*

Изучены условия количественного анализа методом газожидкостной хроматографии с пламенно-ионизационным детектором (ГЖХ-ПИД) летучих карбоновых кислот в спиртовых дистиллятах и крепких алкогольных напитках (зерновые дистилляты, виски, ром, текила, коньяк). Для анализа использовали газовый хроматограф Agilent 8890 с пламенно-ионизационным детектором и системой автоматического ввода проб (Agilent, США). Показано, что в подобранных условиях времени удерживания, чувствительность к микропримесям, селективность карбоновых кислот - уксусной, пропионовой, масляной, изомасляной, валериановой и изовалериановой, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к типовым экспрессным методикам ГЖХ-ПИД. Рекомендовано на базе выполненных исследований разрабатывать аттестованную методику измерений концентраций карбоновых кислот методом ГЖХ-ПИД.

Ключевые слова: газовая хроматография, многокомпонентные среды, летучие органические кислоты, алкогольные напитки.

**GAS CHROMATOGRAPHIC METHOD FOR DETERMINING THE MASS
CONCENTRATION OF VOLATILE ORGANIC ACIDS IN COMPLEX
MULTICOMPONENT ENVIRONMENTS**

Ya. O. Rudakov¹, N. V. Shelekhova², O. B. Rudakov¹, A. E. Kuraeva¹, K. K. Polyansky³

¹*Voronezh State Technical University, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84*

²*VNIIPBT- branch of the Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology, Moscow*

³*Voronezh branch of the Russian University of Economics, Voronezh*

**Corresponding author: Yaroslav O. Rudakov, e-mail: orudakov@cchgeu.ru*

The conditions for quantitative analysis of volatile carboxylic acids in alcohol distillates and alcoholic beverages (grain distillates, whiskey, rum, tequila, and cognac) using gas-liquid chromatography with a flame ionization detector (GLC-FID) have been studied. An Agilent 8890 gas chromatograph with a flame ionization detector and an automatic sample introduction system (Agilent, USA) was used for the analysis. It has been shown that under the selected conditions, the retention times, sensitivity to microimpurities, and selectivity of the carboxylic acids acetic, propionic, butyric, isobutyric, valeric, and isovaleric, meet the requirements for typical express GLC-FID methods. Based on the conducted research, it is recommended to develop an approved method for measuring the concentrations of carboxylic acids using GLC-FID.

Keywords: gas chromatography, multicomponent media, volatile organic acids, alcoholic beverages.

Введение

Современный этап развития аналитической химии характеризуется повышенным вниманием к методам, позволяющим с высокой точностью и селективностью определять состав сложных многокомпонентных сред [1-4]. Одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов анализа сложных смесей является метод газовой хроматографии (ГХ). Благодаря высокой разрешающей способности, чувствительности и возможности автоматизации процесса ГХ стала незаменимым инструментом для изучения многокомпонентных матриц [5,6].

К многокомпонентным матрицам относятся пищевые продукты, в том числе и алкогольные напитки (зерновые дистилляты, виски, ром, текила, коньяк), биологические жидкости (кровь, моча), экологические пробы (почвы, воды, атмосферные осадки), фармацевтические препараты и многие другие объекты [7,8]. Анализ сложных многокомпонентных сред – одна из важных и актуальных задач современной аналитической химии [9]. Это в полной мере относится и к алкогольной продукции [10-12].

Важно отметить, что особую сложность представляет определение в спиртных напитках летучих органических соединений, в том числе и кислот, играющих важную роль в формировании органолептических свойств продуктов. Летучие кислоты образуются в процессе брожения, выдержки и хранения алкогольных напитков [13,14]. Присутствие кислот в спиртных напитках в определённых количествах необходимо, так как они участвуют в формировании сложного ароматического профиля коньяка, виски и других алкогольных напитков, однако избыток летучих кислот приводит к появлению неприятных уксусных и ацетоновых тонов, ухудшающих качество продукта [15-16]. Органические кислоты играют важную роль в формировании потребительских характеристик дистиллятов и напитков на их основе, а также в определении их качества и стабильности [17].

В этой связи разработка новых аналитических методик определения химического состава дистиллятов и спиртных напитков на их основе важна для научных исследований в области технологии алкогольных напитков. Разработка методики позволит более точно контролировать содержание летучих кислот на различных этапах производства, что способствует повышению качества продукции и снижению риска выпуска некачественной продукции [18]. Расширение перечня определяемых аналитов позволит изучать влияние различных факторов на качество и химический состав спиртных напитков, разрабатывать новые технологии производства и улучшать органолептические характеристики.

Цель исследования – выявить принципиальную возможность газохроматографического определения летучих кислот в спиртных дистиллированных напитках.

Материалы и методы

Объектами исследований служили образцы дистиллятов, коньяка, виски, текилы, рома. Для анализа использовали газовый хроматограф Agilent 8890 с пламенно-ионизационным детектором и системой автоматического ввода проб (Agilent, США). Разделение компонентов проводили на капиллярной колонке высокой полярности HP FAPF 19091F-115 (США). Для калибровки газохроматографической системы использовали модельные растворы с известными концентрациями целевых аналитов. Построение калибровочных графиков для целевых аналитов проводили с использованием модельных растворов. Идентификацию осуществляли по времени удерживания, сопоставляли времена удерживания аналитов в пробах со временами удерживания аналитов в модельных растворах. Для каждого образца проводили не менее 3-х параллельных вводов пробы, регистрировали время удерживания и площадь компонента. За окончательный результат для каждого аналита принимали среднее арифметическое значение концентрации, полученное в параллельных измерениях.

Обсуждение результатов

В качестве научного задела для разработки газохроматографической методики определения летучих органических кислот в дистиллятах и спиртных напитках, приготовленных на их основе, предложены начальные режимные параметры хроматографирования для определения уксусной, пропионовой, изомасляной, масляной, изовалериановой, валериановой и капроновой кислот в дистиллятах и напитках на их основе: объем ввода пробы 0,5-1 мкл., газ-носитель азот, скорость потока газа-носителя 0,072-0,144 дм³/ч, скорость потока водорода 1,8 дм³/ч, скорость потока воздуха 18 дм³/ч, температура детектора

200-250 °С, температура испарителя (инжектора)
160-220 °С, коэффициент деления потока 20:1, начальная температура термостата колонок 110-180 °С. С использованием предложенных параметров получена хроматограмма модельного раствора. Установлено, что пики целевых соединений имеют симметричную гауссову форму без признаков уширения или асимметрии, что свидетельствует о корректном хроматографическом разделении компонентов.

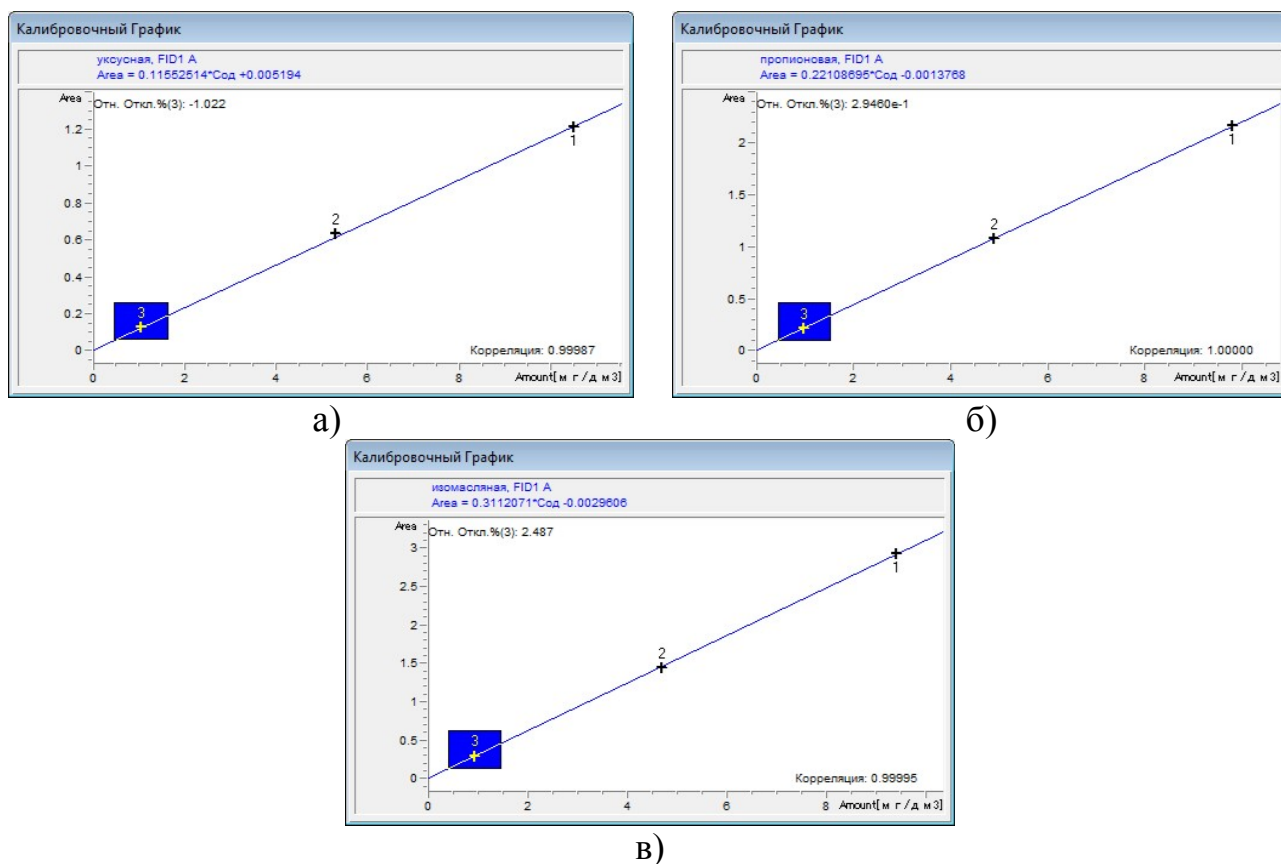


Рис. 1. Градуировочные графики а) уксусной кислоты, б) пропионовая кислота, в) изомасляная кислота

С использованием полученных хроматограмм были построены градуировочные графики (рис. 1). Установлено, что площадь хроматографического пика целевого компонента пропорциональна содержанию соответствующего компонента в пробе. Коэффициент корреляции (R^2) составлял не менее 0.99, что подтверждает высокую степень линейной зависимости между измеряемыми параметрами.

Таким образом, на основании вышеизложенного, сделано предварительное заключение о возможности разработки точной и воспроизводимой методики для качественного и количественного определения содержания летучих органических кислот в алкогольных напитках газохроматографическим методом.

В ходе работ с использованием предложенных режимов хроматографирования исследована возможность определения уксусной, пропионовой, изомасляной, масляной, изовалериановой, валериановой, капроновой в спиртных напитках. Получены новые экспериментальные данные о содержании органических кислот в зерновых дистиллятах (табл.1).

Показано, что в составе летучих органических кислот исследованных дистиллятов преобладает уксусная кислота, обнаруженная в диапазоне массовых концентраций 148,52-318,51 мг/дм³, второе место занимает пропионовая кислота, найденная в диапазоне 5,63-34,10 мг/дм³, на третьем месте - масляная кислота, зафиксированная в диапазоне 0,63-24,20 мг/дм³.

Таблица 1

Результаты исследования летучих кислот в зерновых дистиллятах

Целевой аналит	Дистиллят (Шотландия)	Дистиллят пшеница-1 (Россия)	Дистиллят кукуруза (Россия)	Дистиллят пшеница -2 (Россия)
уксусная кислота, мг/дм ³	318,51	196,39	239,42	148,52
пропионовая кислота, г/дм ³	8,51	24,40	34,10	5,63
изомасляная кислота, г/дм ³	1,24	2,46	3,44	0,16
масляная кислота, мг/дм ³	0,86	24,20	14,91	0,63
изовалериановая кислота, мг/дм ³	2,59	5,02	3,10	0,19
валериановая кислота, мг/дм ³	-	0,30	0,21	0,53
капроновая кислота, мг/дм ³	-	-	0,42	-

Перспективой проведенных исследований может стать электронная база данных (БД), отражающая характерный состав органических кислот для

различных типов алкогольных напитков, включая количественные показатели их содержания.

С применением предложенных режимов проанализированы образцы коньяка, виски, текилы, рома. В качестве иллюстрации на рис. 2 представлена хроматограмма рома №1.

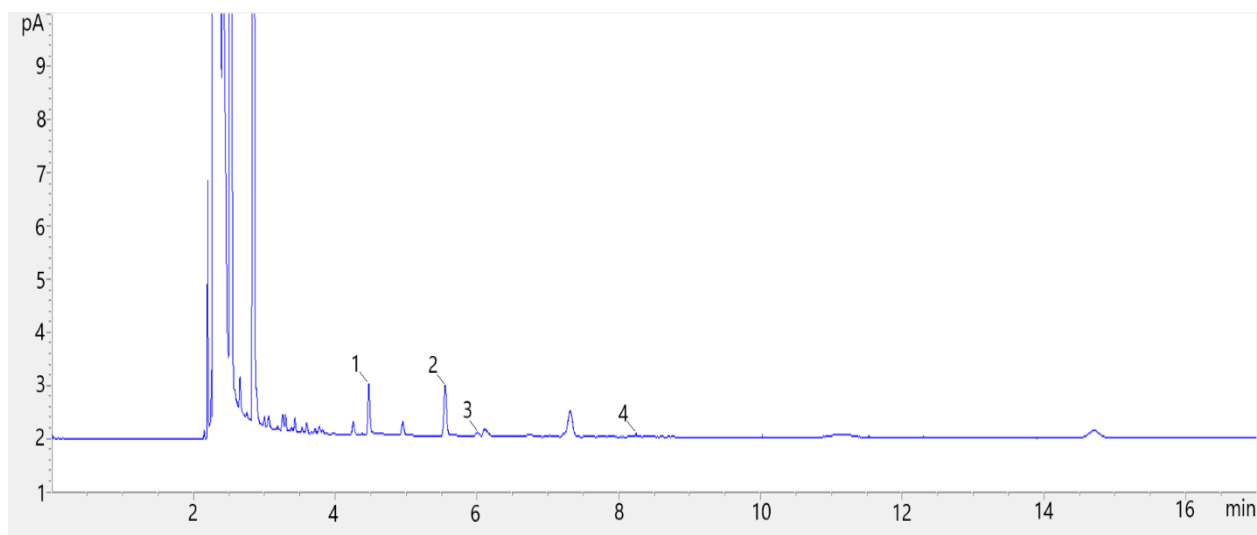


Рис. 2. Хроматограмма образца рома №1: 1-уксусная кислота, 2-пропионовая кислота, 3-изомасляная кислота, 4- изовалериановая кислота

Важно отметить, что хроматограмма, фиксирующая времена удерживания, интенсивность, форму и расположение пиков органических кислот и не идентифицированных пиков, может быть использована в качестве «отпечатка пальца» для формирования электронной БД визуальных профилей состава кислот в различных типах алкогольных напитков, которая позволит систематизировать хроматографические паттерны, проводить экспресс-идентификацию алкогольной продукции и выявлять отклонения от эталонных показателей по визуальным маркерам анализа.

Следует подчеркнуть, что цифровые технологии, применимые в аналитическом контроле совместно с методом газовой хроматографии, позволяют автоматизировать процесс анализа. Так, например, нейросети и алгоритмы машинного обучения обрабатывают хроматограммы, идентифицируют пики,

сопоставляют их с библиотеками спектров и рассчитывают концентрации компонентов. Применение цифровых технологий в аналитической практике позволяет оптимизировать инструментальный анализ и сократить время анализа, за счет минимизирования влияния человеческого фактора [19, 20].

Таким образом, выявлена перспективность разработки газохроматографической методики определения массовой концентрации летучих кислот (уксусной, пропионовой, изомасляной, масляной, изовалериановой, валериановой, капроновой) в дистиллятах и спиртных напитках на их основе.

Заключение

1. Выдвинуто предварительное предположение о возможности разработки методики для определения качественного и количественного состава летучих компонентов в сложных многокомпонентных средах (на примере дистиллятов и крепких алкогольных напитков, в том числе: коньяка, виски, текилы, рома) методом газовой хроматографии.

2. В результате визуального анализа графических результатов исследований (хроматограмм) установлено, что использование предложенных параметров хроматографирования обеспечивает высокое качество разделения компонентов модельного раствора. Сделан вывод о том, что хроматограммы могут быть использованы в качестве «отпечатка пальца» для формирования электронной БД визуальных профилей спиртных напитков.

3. Получены новые экспериментальные данные о содержании органических кислот в зерновых дистиллятах, которые могут быть использованы для контроля качества, оптимизации технологических процессов производства спиртных дистиллированных напитков, формирования электронной базы данных (БД) по характерному составу кислот для разных типов алкогольных напитков

4. В ходе работ подтверждена корректность подобранных режимных параметров хроматографирования для дальнейшего использования в аналитической

практике. Проведенное исследование может служить основой для разработки методики определения летучих органических кислот в алкогольной продукции.

Список литературы

1. Золотов Ю.А. Методологические аспекты аналитической химии // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76. № 1. С. 5-19.
2. Золотов Ю.А. О российских кафедрах аналитической химии. // Журнал аналитической химии. 2024. Т. 79. № 12. С. 1385-1386.
3. Рудаков О.Б., Никитина С.Ю. Тренды в аналитическом контроле качества питьевого этанола // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21. №3. С. 180–196.
4. Золотов Ю.А. Отечественные исследования по истории химии // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 10. С. 915-922.
5. Шелехова Н.В., Шелехова Т.М., Скворцова Л.И., и др. Методы газовой хроматографии, капиллярного электрофореза, хромато-масс-спектрометрии в аналитическом контроле спиртных напитков // Пищевая промышленность. 2021. № 9. С. 63-64.
6. Buglass AJ. Handbook of alcoholic beverages: Technical, analytical and nutritional aspects. John Wiley & Sons; 2011. 1208 p.
7. Ковалева Е.Л., Золотов Ю.А., Сомов Д.В. Обеспечение качества лекарственных средств: основные научные подходы и методы контроля // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2023. Т. 13. № 3. С. 368-375.
8. Гашимова Э.М., Темердашев А.З., Порханов В.А., Поляков И.С., Перунов Д.В., Подживотов А.С., Малицкая Т.Ю. Оптимизация подготовки проб мочи для ГХ-МС определения летучих органических соединений // В сборнике: Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии. Материалы VII Всероссийского симпозиума с международным участием. Краснодар, 2025. С. 84.

9. Иванова Ю.П., Иванов М.Ю., Буряк А.К. Математические модели динамических процессов адсорбции и тепломассопереноса в многокомпонентных смесях. Учебное пособие (2-е издание, исправленное) Москва, 2024. 100 с.
10. Шелехова Н.В. Комплексная система контроля технологических процессов производства алкогольной продукции: монография. Москва, 2025. 288 с.
11. Елисеев М.Н., Неверов Ф.А., Грибкова И.Н. Исследование качества ирландских виски, реализуемых на рынке РФ // Пиво и напитки. 2021. № 3. С. 20-25.
12. Ashmore P.L., DuBois A., Tomasino E., Harbertson J.F., Collins T.S. Impact of Dilution on Whisky Aroma: A Sensory and Volatile Composition Analysis // Foods. 2023. Vol. 12. 1276.
13. Четвериков В.И. Анализ сырья и получение зерновых дистиллятов для алкогольных напитков типа "Виски" // В сборнике: Проблемы, перспективы биотехнологии и биологических исследований. Материалы VIII Региональной конференции студентов младших курсов. 2018. С. 66-69
14. Волкова С.В., Яковлева О.В. Оценка качества дистиллятов для производства виски из некоторых видов зернового сырья местной селекции // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. 2019. № 1 (26). С. 77-83.
15. Шелехова Н.В., Шелехова Т.М., Скворцова Л.И., и др. Определение летучих органических примесей в виски методом газовой хромато-масс-спектрометрии // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 787-796.
16. Шелехова Н.В. Исследование компонентного состава зерновых дистиллятов российского производства // Химия растительного сырья. 2025. № 4. С. 386–398.
17. Okolo C.A., Kilcawley K.N., O'Connor C. Recent advances in whiskey analysis for authentication, discrimination, and quality control. // Compr Rev Food Sci Food Saf. 2023. V. 22. No. 6. P. 4957-4992.

18. Собина Е.П., Аронов П.М., Мигаль П.В., и др. Алгоритмы оценивания однородности стандартных образцов состава и свойств дисперсионных монолитных материалов // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. №3. С. 77-91.

19. Ставрианиди А.Н., Колмаков И.Г., Оловянишников А.Р., и др. Использование газовой-хроматографии и масс-спектрометрии для получения «отпечатков пальцев» пищевых и эфирных масел // В сборнике: IV Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием. Материалы конференции. 2023. С. 219.

20. Шелехова Н.В., Поляков В.А., Римарева Л.В. Специализированный программный комплекс "C₂H₅ОН-аналитик" – инновационный инструмент автоматизации контроля качества и безопасности алкогольной продукции // Пищевая промышленность. 2015. № 9. С. 28-31.

References

1. Zolotov Yu.A. Methodological aspects of analytical chemistry // Journal of Analytical Chemistry. 2021. V. 76. No. 1. P. 5-19. (in Russian)

2. Zolotov Yu.A. On Russian departments of analytical chemistry // Journal of Analytical Chemistry. 2024. V. 79. No. 12. P. 1385-1386. (in Russian)

3. Rudakov O.B., Nikitina S.Y. Trends in analytical quality control of drinking ethanol // Analytica and control. 2017. V. 21, No. 3. P. 180-196. (in Russian)

4. Zolotov Yu.A. Domestic research on the history of chemistry // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2024. V. 94. No. 10. P. 915-922. (in Russian)

5. Shelekhova N.V., Shelekhova T.M., Skvortsova L.I., et al. Methods of gas chromatography, capillary electrophoresis, chromato-mass spectrometry in the analytical control of alcoholic beverages // Food industry. 2021. No. 9. P. 63-64. (in Russian)

6. Buglass A.J. Handbook of alcoholic beverages: Technical, analytical and nutritional aspects. John Wiley & Sons; 2011. 1208 p.

7. Kovaleva E.L., Zolotov Yu.A., Somov D.V. Quality assurance of medicines: basic scientific approaches and control methods // Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical devices. Regulatory research and expertise of medicines. 2023. V. 13. No. 3. P. 368-375. (in Russian)

8. Hashimova E.M., Temerdashev A.Z., Porkhanov V.A., et al. Optimization of urine sample preparation for GC-MS determination of volatile organic compounds // In the collection: Separation and concentration in analytical chemistry and radiochemistry. Proceedings of the VII All-Russian Symposium with international participation. Krasnodar, 2025. p. 84. (in Russian)

9. Ivanova Yu.P., Ivanov M.Yu., Buryak A.K. Mathematical models of dynamic processes of adsorption and heat and mass transfer in multicomponent mixtures // Study guide (2nd edition, revised) Moscow, 2024. 100 p. (in Russian)

10. Shelekhova N.V. An integrated control system for the technological processes of alcohol production: a monograph. Moscow, 2025. 288 p. (in Russian)

11. Eliseev M.N., Neverov F.A., Gribkova I.N. Quality study of Irish whiskey sold on the Russian market // Beer and beverages. 2021. No. 3. P. 20-25. (in Russian)

12. Ashmore P.L., DuBois A., Tomasino E., et al. Impact of Dilution on Whisky Aroma: A Sensory and Volatile Composition Analysis // Foods. 2023. V. 12. P. 1276.

13. Chetverikov V.I. Analysis of raw materials and production of grain distillates for alcoholic beverages such as "Whiskey" // In the collection: Problems, prospects of biotechnology and biological research. Materials of the VIII Regional Conference of Junior Students. 2018. P. 66-69. (in Russian)

14. Volkova S.V., Yakovleva O.V. Evaluation of the quality of distillates for the production of whiskey from certain types of grain raw materials of local selection // Bulletin of the Mogilev State University of Food. 2019. No. 1 (26). P. 77-83. (in Russian)

15. Shelekhova N.V., Shelekhova T.M., Skvortsova L.I., et al. Determination of volatile organic impurities in whiskey by gas chromatography-mass

spectrometry // Machinery and technology of food production. 2022. V. 52. No. 4. P. 787-796. (in Russian)

16. Shelekhova N.V. Investigation of the component composition of grain distillates of Russian production // Chemistry of vegetable raw materials. 2025. No. 4. С. 386–398. (in Russian)

17. Okolo C.A., Kilcawley K.N., O'Connor C. Recent advances in whiskey analysis for authentication, discrimination, and quality control. // Compr Rev Food Sci Food Saf. 2023. V. 22. No. 6. P. 4957-4992.

18. Sobina E.P., Aronov P.M., Migal P.V., et al. Algorithms for estimating the uniformity of standard samples of the composition and properties of dispersion monolithic materials // Standards. Standard samples. 2023. No. 3. P. 77-91. (in Russian)

19. Stavrianidi A.N., Kolmakov I.G., Olovyanishnikov A.R., et al. The use of gas chromatography and mass spectrometry to obtain "fingerprints" of edible and essential oils // In the collection: IV All-Russian Conference on Analytical Spectroscopy with international participation. Conference materials. 2023. p. 219. (in Russian)

20. Shelekhova N.V., Polyakov V.A., Rimareva L.V. Specialized software package "C₂H₅OH-analyst" – an innovative tool for automation of quality control and safety of alcoholic beverages // Food industry. 2015. No. 9. P. 28-31. (in Russian)

Рудаков Ярослав Олегович – канд. хим. наук, ассистент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Шелехова Наталия Викторовна – д-р техн. наук, зав. лабораторией хроматографии ВНИИПБТ, филиал ФГБУН ФИЦ питания и биотехнологии

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Кураева Анастасия Евгеньевна – инженер кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Полянский Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский филиал РЭУ

УДК 543.544.5.068.7

ЭКСТРАКЦИОННО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАБЕНОВ В ВОДНЫХ СРЕДАХ

А.В. Пилицына¹, А.С. Губин², Н.Ю. Санникова², П.Т. Суханов²

¹*Воронежский государственный медицинский университет,
Российская Федерация, 394036, г. Воронеж, ул. Студенческая, д. 10*

²*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, 394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19*

**Адрес для переписки: Суханов Павел Тихонович, e-mail: pts@vsuet.ru*

Изучена экстракция метил-, этил-, пропилпарабенов смесями спиртов из водных растворов в присутствии сульфата аммония. Обоснован состав подвижной фазы при разделении парабенов методом хроматографии в тонком слое. Для обработки результатов отдельного определения консервантов применен офисный сканер и персональный компьютер. Разработан способ определения парабенов в водных растворах методом хроматографии в тонком слое на уровне 0,1 – 0,01 мкг/дм³.

Ключевые слова: парабены, экстракция, концентрирование, идентификация, хроматография в тонком слое

EXTRACTION-CHROMATOGRAPHIC DETERMINATION OF PARABENS IN AQUEOUS ENVIRONMENTS

A.V. Pilitsina¹, A.S. Gubin², N.Yu. Sannikova², P.T. Sukhanov²

¹*Voronezh State Medical University, Studencheskaya St., 10, Voronezh, 394036, Russian Federation*

²*Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394036,
Russian Federation*

**Corresponding author: Pavel T. Sukhanov, e-mail: pts@vsuet.ru*

The extraction of methyl, ethyl, and propyl parabens with alcohol mixtures from aqueous solutions in the presence of ammonium sulfate was studied. The composition of the mobile phase for paraben separation by thin-layer chromatography was substantiated. An office scanner and a personal computer were used to process the results of the separate determination of preservatives. A method for the determination of parabens in aqueous solutions by thin-layer chromatography at a level of 0.1–0.01 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ was developed.

Key words: parabens, extraction, concentration, identification, thin-layer chromatography

Введение

Парабены (ПБ) – сложные эфиры *n*-гидроксibenзойной кислоты, широко применяющиеся как консерванты в косметической и пищевой промышленности. Наиболее распространены метилпарабен (МП), этилпарабен (ЭП) и пропилпарабен (ПП). Природа, число функциональных групп, строение молекул определяют влияние вещества на живые организмы. Длинноцепочечные парабены более токсичны, при этом короткоцепочечные могут способствовать распространению генов устойчивости к антибиотикам. Продукты деградации парабенов под действием гидроксильных радикалов также становятся токсичнее для организмов, таких как зелёные водоросли с ростом длины цепи [1-4].

ПБ широко применяются в качестве консервантов пищевых продуктов (E218, E214, E216 и E211 для МП, ЭП и ПП соответственно), также входят в состав фармацевтических препаратов и большинства средств личной гигиены и [5-7]. Косметические средства широко используются практически повсеместно и служат главным источником комплексного поступления парабенов в организм человека [8] и далее в окружающую среду.

ПБ условно относятся к малотоксичным соединениям. Однако многие из них вызывают эндокринные нарушения и могут быть канцерогенными. Еще одним осложнением, возникающим при их систематическом потреблении, является парабеновая аллергия [9]. Консерванты влияют на эндокринную систему, в частности на функционирование половых гормонов у рыб [10].

Задачи определения консервантов условно можно разделить на две большие группы. Во-первых, определение непосредственно в объектах окружающей среды

(относительно высокие концентрации). Во-вторых, определение в природных средах и тканях, органах живых организмов (микро- и ультрамикрoконцентрации).

Обе группы объектов требуют разных подходов к анализу, но характеризуются одинаковыми проблемами. Парабены – достаточно проблемный объект для идентификации. Это связано с тем, что аналиты не образуют окрашенных соединений с высокими коэффициентами поглощения, не проявляют высокой электрохимической активности, поэтому наиболее простые и применимые электрохимические и спектрофотометрические методы не находят широкого применения. Применение современных методов (масс-спектроскопия, ВЭЖХ и других) ограничено для больших концентраций необходимостью очень высокой степени очистки исходной матрицы от мешающих компонентов, при анализе малых концентраций сложностью селективной экстракции определяемых соединений.

Метод тонкослойной хроматографии (ТСХ) широко используется для определения парабенов, благодаря своей эффективности и высокой чувствительности. Установлено, что использование мицеллярных растворов неионогенных ПАВ позволяет улучшить разделение парабенов за счет формирования мицеллярной псевдофазы, что обеспечивает высокую селективность и чувствительность с пределом обнаружения до 0,63 мкг [11-12]. Обнаружено, что разработка денситометрических и видеоденситометрических методов обработки хроматограмм снижает пределы обнаружения до 0,50–3,49 мкг/л и даже до 10–40 нг/образец, что важно для точного контроля содержания парабенов в лекарствах, косметике и микстурах [13].

ТСХ позволяет одновременно определять парабены в сложных смесях с другими веществами (например, алпрозолам, малеат хлорфенирамина, дексаметазон), что демонстрирует универсальность и селективность метода [14]. Применение как обычных, так и модифицированных пластин (с цианопропильными группами, силикагелем, КС18) и разнообразных подвижных фаз обеспечивает адаптацию метода для разных задач, включая анализ в фармацевтике и биологических материалах (накопление парабенов в опухолевых тканях) [15]. Высокая чувствительность и возможность визуализации (УФ-излучение, флуоримет-

рия, хромогенные реагенты) делают ТСХ удобным, быстрым и малозатратным способом для регулярного контроля безопасности и качества парабен-содержащих препаратов.

Цель исследования – разработать способ экстракционно-хроматографического определения парабенов в водных растворах

Экспериментальная часть

Из препаратов (чистота 99,5 % мас.) готовили стандартные растворы метилпарабена, этилпарабена и пропилпарабена с концентрацией каждого 0,4 и 0,8 % мас.

Предварительное концентрирование аналитов выполняли эквимольными смесями октилового и изобутилового спирта (квалификации «ч»): к 9 см³ водного раствора консервантов добавляли кристаллический сульфат аммония (хч) до насыщения и 1 см³ смеси спиртов. После достижения равновесия и разделения водной и органической фаз концентрат отбирали микрошприцем и наносили на линию старта хроматографической пластины (Silufol UV-254).

В качестве подвижной фазы применяли смеси растворителей на основе изобутилового, нонилового и октилового спиртов с добавлением дистиллированной воды или водного раствора аммиака (5% мас.). Помещали эти смеси в хроматографическую камеру и насыщали парами подвижной фазы 15 – 20 минут. ПБ разделяли в хроматографических камерах размером 10x15 см. Пластины предварительно активировали и высушивали при 100 ± 5 °С.

Идентифицировали парабены облучение УФ-светом при 254 нм по тушению люминесценции (серые пятна ПБ на розовом или розово-коричневом, или розово-сером фоне). Хроматограммы фотографировали или сканировали, сохраняли изображения в формате jpeg.

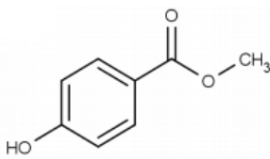
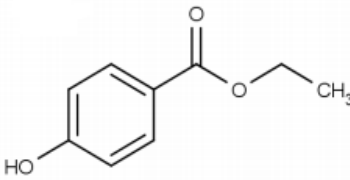
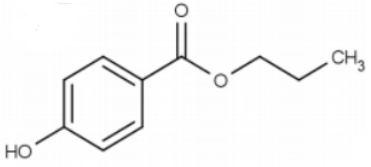
Для перевода из формата RGB в CMYK, хроматограммы обрабатывали с помощью программного обеспечения Adobe Photoshop CS6™ и ПО DxO Optics Pro 9™. Далее вычисляли площади зон, коэффициенты R_f и другие характеристики с применением программного обеспечения Sorbfil™.

Результаты и их обсуждение

Парабены – сложные органические соединения, содержащие в структуре гидрофильные гидрофобные группы. Структурные формулы и характеристики исследуемых ПБ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Структурные формулы и некоторые физико-химические характеристики исследуемых парабенов

Парабен	Структурная формула	log P*
Метилпарабен		1,66
Этилпарабен		2,19
Пропилпарабен		2,71

*Значения logP рассчитывали с применением программы ChemSketch.

Установлено, что для наиболее полного извлечения исследуемых соединений из водных сред эффективны экстрагенты, содержащие эквимольные смеси нониловый – изобутиловый спирты и октиловый – изобутиловый спирты. На рис. 1 приведена изотерма экстракции метилпарабена смесью изобутиловый – октиловый спирт. Для других парабенов зависимости аналогичны.

При соотношении водной и органической фаз 9:1 обеспечивается практически полное извлечение парабенов из водных сред (табл. 2).

При выборе подвижной фазы для хроматографического разделения учитывалась эффективность распределения аналитов между смесью спиртов и водной фазой.

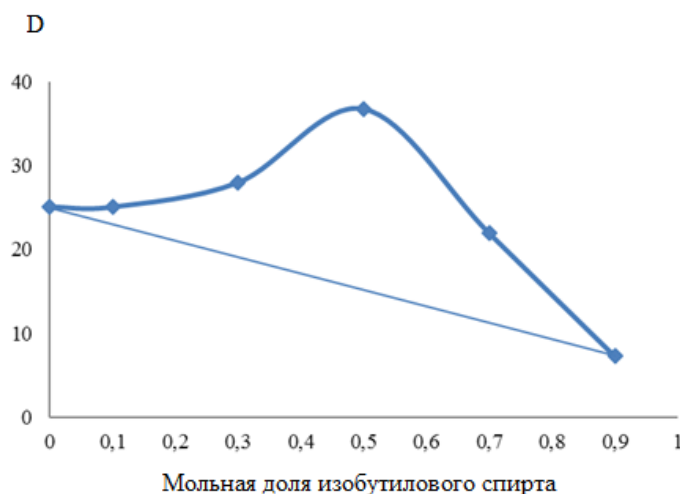


Рис. 1. Изотерма экстракции метилпарабена смесью изобутиловый – октиловый спирт

Таблица 2

Извлечение парабенов эквимольными смесями спиртов

Вещество	Степень извлечения	
	нониловый – изобутиловый спирт	октиловый – изобутиловый спирт
Метилпарабен	95	95,0
Этилпарабен	95	95,5
Пропилпарабен	96	95,5

Установлено, что при использовании подвижных фаз, состоящих из смесей в разном соотношении спиртов, порядок элюирования компонентов изменяется.

В системах с максимальным количеством октилового спирта по увеличению коэффициентов подвижности компоненты располагаются в ряду: *пропилпарабен < этилпарабен < метилпарабен*.

Для эквимольных смесей октиловый спирт – изобутиловый спирт порядок элюирования следующий: *пропилпарабен < метилпарабен < этилпарабен*.

В системах с преобладанием бутилового спирта ряд компонентов обращается: *пропилпарабен > метилпарабен > этилпарабен*.

Селективность разделения повышается при введении в подвижную фазу воды. В качестве примера приводим хроматограмму смеси парабенов с применением подвижной фазы вода – изобутиловый – октиловый спирты и результаты ее обработки с применением ПО Sorbfil™ (рисунок 2). Идентификацию

компонентов смеси выполняли одновременным хроматографированием индивидуальных веществ. В качестве мешающего агента в смесь аналитов вводили часто применяемый консервант – бензоат натрия.

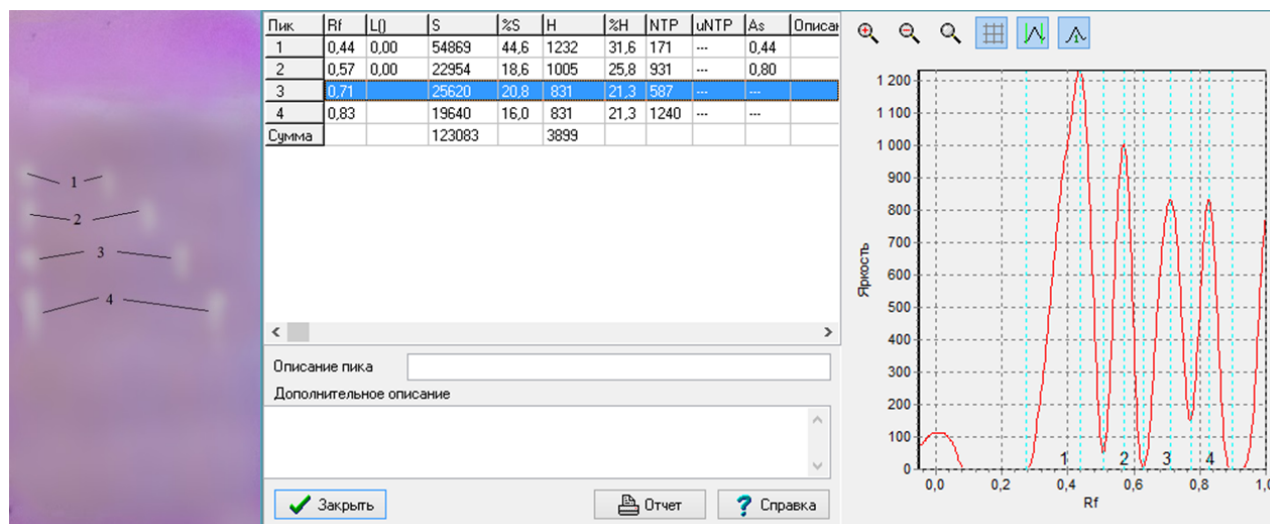


Рис. 2. Хроматограмма смеси бензоата натрия (4), метилпарабена (3), этилпарабена (2), пропилпарабена (1) (в присутствии «свидетелей» - справа на хроматограмме) смесью вода (1%) – изобутиловый спирт 0,3 мол. д. – нониловый спирт 0,7 мол. д. и результаты ее обработки с применением ПО Sorbfil™

Результаты разделения смесей парабенов от состава подвижной фазы представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Зависимость коэффициентов подвижности парабенов от состава подвижной фазы

Состав подвижной фазы (спирты – мол. д., вода – %)			Коэффициенты подвижности		
Спирт		Вода	метил- парабена	этил-парабена	пропил- парабена
изобутиловый	октиловый				
0,3	0,7	1	0,60	0,50	0,39
0,5	0,5	1	0,49	0,50	0,06
0,7	0,7	1	0,57	0,46	0,34

Наихудшее разделение достигается в смесях, содержащих примерно одинаковые количества органических растворителей в смесях, а при обработке с применением ПО Sorbfil™ в таких системах отмечаются ложные пики.

Для повышения элюирующей силы к ПФ вместо воды добавляли 5% раствор аммиака. Добавка соединения с щелочной реакцией среды существенно повышает растворимость парабенов, а также приводит во всех системах к существенному улучшению разделения, однако при этом хроматографические зоны размываются.

Таблица 4

Зависимость коэффициентов подвижности парабенов от состава подвижной фазы

Состав подвижной фазы (спирты мол. д., вода – %)			Коэффициенты подвижности		
Спирт		Вода	метил- парабена	этил- парабен	пропил- парабен
изобутиловый	нониловый				
0,3	0,7	1	0,71	0,57	0,44
0,5	0,5	1	0,63	0,49	0,38
0,7	0,7	1	0,65	0,51	0,32

В хроматографических системах с применением подвижных фаз изобутиловый – нониловый спирты установлены аналогичные изменения коэффициентов R_f , а также ряды элюирования (таблица 4). Однако, разрешение пиков значительно лучше, чем в системах на основе октилового спирта. Размывание пиков также снижается. При обработке хроматограмм в ПО «Sorbfil» ложные пики отсутствуют, а пики, соответствующие анализам имеют форму кривых Гаусса (изотермы сорбции линейны).

В качестве примера приводим хроматограмму смеси парабенов и бензоата натрия с применением подвижной фазы изобутиловый – октиловый спирт в соотношении 0,3 : 0,7 мол. д. и результаты ее обработки с применением ПО Sorbfil™ (рис. 2).

В молекулах парабенов присутствуют группы, обуславливающие гидрофильность соединения (ОН-группы) и повышающие гидрофобные свойства (сложноэфирная группа). Наиболее гидрофобен пропилпарабен. Одинаковое содержание в смесях изобутилового и октилового или нонилового спирта благоприятствует в большей степени взаимодействию разделяемых веществ только с подвижной фазой (органическими растворителями).

При этом образуются водородные связи с ОН-группами спиртов и реализуются гидрофобные взаимодействия с плохо растворимыми октиловым и нониловым спиртом, различия в подвижности компонентов нивелируется.

Максимальное содержание в смеси изобутилового спирта обуславливает наилучшую растворимость в ПФ более гидрофильных соединений и, наоборот, высокое содержание октилового и нонилового спиртов улучшает растворимость более гидрофобного компонента (пропилпарабен). Добавление водного раствора аммиака повышает растворимость компонентов смеси за счет частичной ионизации ОН-группы.

На основании результатов эксперимента разработан способ определения парабенов в косметической продукции (на примере анализа геля-маски).

Анализ проводят в несколько этапов. На первом отделяют нецелевые компоненты. Для этого 1 г геля помещают в химический стакан, добавляют 3 – 5 капель концентрированной хлороводородной кислоты и 40 см³ ацетона. На водяной бане при постоянном перемешивании смесь нагревают до 60 °С, охлаждают и переносят в делительную воронку. Отбирают 20 см³ раствора и добавляют 60 см³ воды, раствором щелочи доводят рН до 10. Отстаивают 10 минут, добавляют 1 г кристаллического хлорида кальция и встряхивают 10 – 15 минут. Полученный раствор отфильтровывают и помещают в делительную воронку. Добавляют 75 см³ диэтилового эфира и встряхивают 1 минуту. Водную фазу отделяют и добавляют хлороводородную кислоту до рН 2. К полученному раствору добавляют 2 см³ изомолярной смеси изобутилового и нонилового спиртов и экстрагируют 10 мин. После расслаивания фаз отбирают экстракт микрошприцем.

Предварительно в хроматографическую камеру помещают элюент, состоящий из 5% водного раствора аммиака (1 % от объема смеси спиртов) и, смеси 0,3 мол. д. изобутилового и 0,7 мол. д. нонилового спиртов и выдерживают 5-20 мин.

Экстракт из микрошприца помещают на стартовую линию хроматографической пластины, выдерживают до продвижения фронта растворителя до 10 мм верхнего края пластины. Парабены идентифицируют по коэффициентам R_f при УФ-облучении (254 нм). Размер пятен парабенов (в пикселях) определяют с применением ПО Sorbfil™. Содержание парабенов в геле устанавливают по

градуировочным графикам, построенным по стандартным растворам парабенов в условиях, повторяющих все процедуры анализа продукта. Нами идентифицированы парабены, заявленные производителем, установлено, что содержание каждого парабена в геле составляет 0,2 % мас.

Заключение

Разработан способ хроматографического разделения в тонком слое трех изомеров парабенов, применяемых в качестве консервантов в косметических препаратах. Способ включает предварительную экстракцию парабенов из водных растворов эквимольной смесью изобутилового и октилового спиртов, нанесение полученного концентрата на хроматографическую пластинку и элюирование. Обоснован состав подвижной фазы: изобутиловый спирт – нониловый спирт в соотношении 0,3 : 0,7 мол.д. – раствор аммиака (5 %), добавляемый в количестве 1 % от объема смеси спиртов. Хроматограммы обработаны с применением ПО Sorbfil™. Способ апробирован на примере анализа геля-маски.

Список литературы

1. Liu S., et al. Disparate toxicity mechanisms of parabens with different alkyl chain length in freshwater biofilms: ecological hazards associated with antibiotic resistance // *Science of the Total Environment*. 2023. V. 881. P. 163-168.
2. Gao Y., et al. Theoretical investigation on the kinetics and mechanisms of hydroxyl radical-induced transformation of parabens and its consequences for toxicity: Influence of alkyl-chain length // *Water research*. 2016. V. 91. P. 77-85.
3. Lee J., et al. Toxicities of four parabens and their mixtures to *Daphnia magna* and *Aliivibrio fischeri* // *Environmental Health and Toxicology*. 2018. T. 33. No. 4. P. e2018018.
4. Dasmahapatra A.K., Chatterjee J., Tchounwou P.B. A systematic review of the toxic potential of parabens in fish // *Frontiers in Toxicology*. 2024. V. 6. P. 1399467.
5. Davidson P., Branden A. Antimicrobial activity of non-halogenated phenolic compounds // *Journal of Food Protection*. 1981. V. 44. P. 623-632

6. Soni M.G., Carabin I.G., Burdock G.A. Safety assessment of esters of p-hydroxybenzoic acid (parabens) // *Food Chem Toxicol.* 2005. V. 43. P. 985-1015.
7. Eriksson E., Andersen H.R., Ledin A. Substance flow analysis of parabens in Denmark complemented with a survey of presence and frequency in various commodities // *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 156. P. 240-259.
8. Петрова С.Ю., и др. Суммарное пероральное и трансдермальное поступление парабенов с косметической продукцией в организм различных групп населения // *Актуальные вопросы гигиены: электрон. сб. науч. тр. VI Всерос. заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием.* СПб. 2021. С. 272–279.
9. Darbre P., Harvey W. Paraben esters: review of recent studies of endocrine toxicity, absorption, esterase and human exposure, and discussion of potential human health risks // *J. Appl. Toxicol.* 2008. V. 28. P. 561-578.
10. European Commission, Council Directive of 27 July 1976 on the approximation of the laws of the Member States relating to cosmetic products (76/768/EEC) Consolidated version 2005-09-13
11. Каранди И.В., Китаева Д.Х., Бузланова М.М. Аналитические возможности фотометрического определения метилпарабена в природных водах // *Экоаналитика: сборник тезисов и докладов.* Архангельск. 2011. С. 133.
12. Оскотская Э.Р., Басаргин Н.Н., Грибанов Е.Н. Цифровое фотодетектирование при определении метилпарабена после его предварительного концентрирования сорбентом // *Экоаналитика: сборник тезисов и докладов.* Архангельск. 2011. С. 213.
13. Wang Q., Chen X., Yu R., et al. Количественное определение метилпарабена с использованием спектроскопии пробоя, индуцированного лазером // *Spectrosc and Spectral Anal.* 2011. V. 31. P. 2546-2851.
14. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств: технический регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012. от 20.07. 2012 г., № 58.

15. Dos A.A. Determination of methylparaben by flame atomic absorption spectrometry after its adsorption onto naphthalene modified with 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol (PAN) // *Talanta*. 2007. V. 71. No. 3. P.1252 – 1256.

References

1. Liu S., et al. Disparate toxicity mechanisms of parabens with different alkyl chain length in freshwater biofilms: ecological hazards associated with antibiotic resistance // *Science of the Total Environment*. 2023. V. 881. P. 163-168.

2. Gao Y., et al. Theoretical investigation on the kinetics and mechanisms of hydroxyl radical-induced transformation of parabens and its consequences for toxicity: Influence of alkyl-chain length // *Water research*. 2016. V. 91. P. 77-85.

3. Lee J., et al. Toxicities of four parabens and their mixtures to *Daphnia magna* and *Aliivibrio fischeri* // *Environmental Health and Toxicology*. 2018. V. 33. No. 4. P. e2018018.

4. Dasmahapatra A.K., Chatterjee J., Tchounwou P.B. A systematic review of the toxic potential of parabens in fish // *Frontiers in Toxicology*. 2024. V. 6. P. 1399467.

5. Davidson P., Branden A. Antimicrobial activity of non-halogenated phenolic compounds // *Journal of Food Protection*. 1981. V. 44. P. 623-632

6. Soni M.G., Carabin I.G., Burdock G.A. Safety assessment of esters of p-hydroxybenzoic acid (parabens) // *Food Chem Toxicol*. 2005. V. 43. P. 985-1015.

7. Eriksson E., Andersen H.R., Ledin A. Substance flow analysis of parabens in Denmark complemented with a survey of presence and frequency in various commodities // *J. Hazard. Mater*. 2008. V. 156. P. 240-259.

8. Petrova S. Yu., et al. Total oral and transdermal intake of parabens with cosmetic products into the body of various population groups // *Current issues of hygiene: electronic collection of scientific papers of the VI All-Russian correspondence scientific and practical conference with international participation*. St. Petersburg. 2021. Pp. 272–279. (in Russian)

9. Darbre P., Harvey W. Paraben esters: review of recent studies of endocrine toxicity, absorption, esterase and human exposure, and discussion of potential human health risks // *J. Appl. Toxicol.* 2008. V. 28. Pp. 561-578.

10. European Commission, Council Directive of 27 July 1976 on the approximation of the laws of the Member States relating to cosmetic products (76/768/EEC) Consolidated version 2005-09-13

11. Karandi I.V., Kitaeva D.Kh., Buzlanova M.M. Analytical capabilities of photometric determination of methylparaben in natural waters // *Ecoanalytics: collection of abstracts and reports.* Arkhangelsk. 2011. P. 133. (in Russian)

12. Oskotskaya E.R., Basargin N.N., Gribanov E.N. Digital photodetection in the determination of methylparaben after its preliminary concentration with a sorbent // *Ecoanalytics: collection of abstracts and reports.* Arkhangelsk. 2011. P. 213. (in Russian)

13. Wang Q., Chen X., Yu R., et al. Quantitative determination of methylparaben using laser-induced breakdown spectroscopy // *Spectrosc and Spectral Anal.* 2011. V. 31. P. 2546-2851.

14. Safety requirements for food additives, flavorings and processing aids: Technical Regulations of the Customs Union TR CU 029/2012. dated July 20, 2012, No. 58. (un Russian)

15. Dos A.A. Determination of methylparaben by flame atomic absorption spectrometry after its adsorption onto naphthalene modified with 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol (PAN) // *Talanta.* 2007. V. 71. No. 3. P.1252 – 1256.

Пилицына Алина Витальевна – ассистент кафедры клинической лабораторной диагностики, ВГМУ

Губин Александр Сергеевич – д-р хим. наук, доцент кафедры промышленной экологии и техноферной безопасности, ВГУИТ

Санникова Наталья Юрьевна – канд. хим. наук, доцент кафедры технологии органических соединений и переработки полимеров, ВГУИТ

Суханов Павел Тихонович – д-р хим. наук, профессор кафедры физической и аналитической химии, ВГУИТ

УДК 691.5:620.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ПРИРОДНЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ

А.И. Макеев, О.Б. Кукина, Э.Р. Кудоярова, Д.Ю. Малюков,
М.А. Горбылёв, Д.А. Шпилевой*

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

**Адрес для переписки: Кудоярова Эвелина Романовна, e-mail: kudaeva984@gmail.com*

В данной статье обоснована актуальность использования пылевидных отсевов дробления гранита — крупнотоннажных техногенных отходов — в качестве доступного источника микро- и наноразмерных алюмосиликатных частиц для модифицирования цементных систем нового поколения. Цель работы — экспериментальная оценка возможности выделения из гранитных отсевов методом седиментационной сепарации фракций с заданными размерами частиц (50–160, 10–50, менее 10 мкм и коллоидной) и исследование их гранулометрического состава, удельной поверхности и морфологии. Для характеристики дисперсной фракции (≤ 10 –50 мкм) применён метод лазерной дифракции на анализаторе «Анализетте 22 Nano Тес». Установлено, что средний объёмный диаметр частиц составляет 36–38 мкм, удельная поверхность — около 3000 см²/г (в пересчёте на массу), а средний коэффициент удлинения (аспектное отношение) — 1,55, что свидетельствует о характерной для дроблёных пород оскольчатой вытянутой форме. Дифференциальные кривые распределения демонстрируют основной максимум в области 30–80 мкм и дополнительное «плечо» в субмикронном диапазоне, подтверждающее наличие ультрадисперсной (потенциально наноразмерной) составляющей. Ситовой анализ исходной пылевидной фракции показал, что более 10 % частиц имеют размер менее 50 мкм, что согласуется с данными лазерной дифракции. Полученные результаты создают научно-методическую основу для дальнейших исследований по применению выделенных фракций в качестве активных микронаполнителей бетонов, обеспечивающих повышение плотности, прочности и долговечности композитов при одновременной утилизации техногенных отходов.

Ключевые слова: природные алюмосиликаты, отсеvy дробления гранита, микро- и наноразмерные частицы, седиментационная сепарация, лазерная дифракция, гранулометрический состав, удельная поверхность, морфология частиц, коэффициент удлинения, цементные системы, микронаполнители, техногенные отходы.

EXPERIMENTAL STUDIES PROPERTIES OF MICRO- AND NANOSCALE PARTICLES OF NATURAL ALUMINOSILICATES

*A.I. Makeev, O.B. Kukina, E.R. Kudoyarova, D.Y. Malyukov,
M.A. Gorbylev, D.A. Shpilevoy*

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

**Corresponding author: Evelina R. Kudoyarova, e-mail: kudaeva984@gmail.com*

This article substantiates the relevance of using pulverized granite crushing screenings – large-tonnage man-made waste - as an affordable source of micro- and nanoscale aluminosilicate particles for the modification of new-generation cement systems. The aim of the work is to experimentally evaluate the possibility of separating fractions with specified particle sizes (50-160, 10-50, less than 10 microns and colloidal) from granite screenings by sedimentation separation and to study their granulometric composition, specific surface area and morphology. The method of laser diffraction on the Analysette 22 Nano Tec analyzer was used to characterize the dispersed fraction (<10-50 microns). It was found that the average volume diameter of the particles is 36-38 microns, the specific surface area is about 3000 cm²/g (in terms of mass), and the average elongation coefficient (aspect ratio) is 1.55, which indicates a comminuted elongated shape characteristic of crushed rocks. The differential distribution curves demonstrate the main maximum in the range of 30-80 microns and an additional "shoulder" in the submicron range, confirming the presence of an ultrafine (potentially nanoscale) component. The sieve analysis of the initial dust fraction showed that more than 10% of the particles have a size of less than 50 microns, which is consistent with the data of laser diffraction. The results obtained create a scientific and methodological basis for further research on the use of the isolated fractions as active micro-fillers of concrete, providing increased density, strength and durability of composites while simultaneously disposing of man-made waste.

Keywords: natural aluminosilicates, granite crushing screening, micro- and nanoscale particles, sedimentation separation, laser diffraction, granulometric composition, specific surface area, particle morphology, elongation coefficient, cement systems, micro-fillers, man-made waste.

Введение

Современная технология бетона ориентирована на регулирование структуры цементного камня на микро- и наноуровне. Введение тонкодисперсных минеральных добавок, обладающих пуццолановой активностью либо выполняющих роль центров кристаллизации, позволяет повысить плотность, прочность и долговечность композита. Традиционно в этом качестве используют микрокремнезём, метаксаолин, золы-уноса и природные цеолиты [1, 2]. Однако высокая стоимость и дефицит перечисленных материалов стимулируют поиск альтернативных источников активных микронаполнителей, прежде всего среди многотоннажных техногенных отходов.

Одним из таких источников являются отсе́вы дробления гранитных пород, ежегодное образование которых в России достигает десятков миллионов тонн, а уровень утилизации не превышает 15–20 % [3]. Пылевидная фракция отсе́вов содержит частицы размером от долей микрометра до сотен микрометров, обогащённые алюмосиликатными минералами — полевыми шпатами, слюдами, а также кварцем. Ряд исследований [4–6], а также работы А.И. Макеева и О.Б. Кукиной [15, 16] показывают, что при определённых условиях тонкоизмельчённые магматические породы способны проявлять пуццолановую активность и положительно влиять на микроструктуру цементного теста.

Поиск доступных и дешёвых микро- и наноразмерных материалов является актуальной проблемой производства экономичных строительных конструкций из цементных композитов нового поколения.

Цель данных исследований – оценка возможности использования природных алюмосиликатов как структурообразующих компонентов с микро- и наноразмерными частицами в технологии производства строительных материалов гидратационного твердения нового поколения.

**Анализ применения природных алюмосиликатов
в качестве модификаторов цементных систем**

Целью настоящего обзора является систематизация данных о составе и свойствах гранитных частиц, методах их выделения и модифицирования, а также о влиянии подобных добавок на цементные системы для обоснования выбора объектов и методик дальнейших экспериментальных исследований.

Граниты относятся к кислым магматическим породам и состоят преимущественно из кварца (SiO_2), калиевых полевых шпатов ($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) и кислых плагиоклазов ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$), а также содержат слюды (биотит, мусковит) и роговую обманку [7]. С точки зрения химической активности в щелочной среде цементного теста наибольший интерес представляют полевые шпаты и слюды, структура которых включает алюмокремнекислородный каркас или слои. В отличие от глинистых минералов (каолинита, монтмориллонита), алюмосиликаты гранитов являются каркасными или слоистыми, но не обладают способностью к набуханию и катионному обмену в той же степени, что и глины.

Работы [4, 8] показывают, что тонкий помол гранита (удельная поверхность свыше $300 \text{ м}^2/\text{кг}$) приводит к частичной аморфизации поверхности зёрен и накоплению дефектов кристаллической решётки, что может способствовать взаимодействию с гидроксидом кальция. Кроме того, наличие в гранитной пыли слюд является источником ионов калия и магния, способных участвовать в формировании низкоосновных гидросиликатов кальция и вторичных гелевых фаз [5].

Для извлечения тонких фракций из полидисперсных отходов камнедробления применяются механические, аэродинамические и гидравлические методы классификации. Среди гидравлических методов широко используется седиментационное разделение в жидкой среде, основанное на законе Стокса, которое позволяет без использования дорогостоящего оборудования выделить частицы микрометрового и субмикронного диапазона [9]. Применительно к отсевам дробления гранита этот метод детально исследован в работах А.И. Макеева и О.Б. Кукиной [15, 16], где показана возможность получения фракций с разме-

рами от 100–160 мкм до долей микрометра путём последовательного отстаивания водных суспензий.

Для получения ультрадисперсных (коллоидных) фракций с размерами частиц менее 100 нм применяют комбинацию седиментации и центрифугирования, а также мембранную фильтрацию [11]. В промышленных масштабах перспективным считается применение гидроциклонов и спиральных классификаторов, позволяющих выделять тонкодисперсный материал непосредственно в потоке [3].

Основным методом определения размеров частиц в диапазоне от нанометров до миллиметров является лазерная дифракция, позволяющая оперативно получать интегральные и дифференциальные кривые распределения, удельную поверхность и средние диаметры. Принцип метода заключается в измерении углового распределения интенсивности света, рассеянного на ансамбле частиц; крупные частицы рассеивают свет под малыми углами, мелкие — под большими. Расчёт распределения частиц по размерам основан на теории Фраунгофера или, для субмикронных частиц, на теории Ми [12]. Современные приборы, такие как Analysette 22 NanoТес, позволяют также оценивать коэффициент удлинения (аспектное отношение) частиц, что важно для прогнозирования поведения добавок в цементных смесях.

Морфология частиц гранитной пыли, образующейся при дроблении, принципиально отличается от морфологии глинистых минералов. Если для глин характерна пластинчатая или трубчатая форма (каолинит, галлуазит) [13], то частицы гранита, согласно [5, 8], имеют преимущественно оскольчатую, угловатую форму с острыми гранями и значительным разбросом фактора удлинения (от 1,3 до 2,5). Данные [16] подтверждают, что именно такие частицы обеспечивают механическое зацепление в структуре цементного камня, но могут увеличивать водопотребность смеси.

Механизм действия тонкомолотых алюмосиликатных добавок в цементных системах обычно связывают с двумя основными эффектами: физическим (микронаполнение) и химическим (пуццолановая реакция). Микронаполнители размером 1–50 мкм заполняют пустоты между зёрнами цемента, уплотняя упа-

ковку и снижая пористость цементного камня [1, 2]. Для этого достаточно инертность добавки по отношению к продуктам гидратации.

Химическая активность частиц гранита долгое время считалась пренебрежимо малой из-за высокой кристалличности полевых шпатов. Однако исследования последних лет [4, 6, 15] демонстрируют, что при повышении дисперсности (удельная поверхность более 400 м²/кг) и в присутствии щелочной среды цементного теста (рН > 12,5) происходит частичное растворение поверхностного слоя алюмосиликатов с образованием гелеобразных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция. В работе [6] показано, что замена 10 % цемента тонкомолотым гранитным отсевом привела к увеличению прочности при сжатии на 15–22 % в возрасте 28 суток, а также к снижению водопоглощения на 18 %. Особый интерес представляют наноразмерные частицы (менее 100 нм), способные выступать в роли центров кристаллизации гидросиликатов кальция и ускорять гидратацию цемента [14].

Замена части цемента или части песка тонкомолотыми гранитными отсевами рассматривается как одно из направлений ресурсосбережения в производстве бетонов. Экономическая эффективность достигается за счёт снижения расхода клинкерной составляющей и утилизации отходов, а экологическая — за счёт сокращения выбросов CO₂ [3]. При этом ключевым условием является контролируемый гранулометрический и минералогический состав добавки. Данные работ [3, 5, 6, 15] указывают на то, что оптимальное содержание гранитной пыли в смеси составляет 5–15 % от массы цемента, а её удельная поверхность должна быть не менее 250 – 300 м²/кг. Таким образом, микро- и наноразмерные алюмосиликатные частицы из отсевов дробления гранита являются перспективным объектом для разработки модификаторов цементных систем, а седиментация и лазерная дифракция — надёжными методами их получения и характеристики.

На основе проведённого анализа литературных данных установлено, что:

- пылевидная фракция отсевов дробления гранита содержит алюмосиликатные минералы, потенциально способные к пуццолановому взаимодействию;

- метод седиментационной сепарации позволяет выделять из отходов частицы заданных размерных диапазонов, включая субмикронные;
- для оценки пригодности выделенных фракций в качестве микронаполнителей цементных систем необходим комплексный анализ их гранулометрического состава, удельной поверхности и морфологии.

Объект исследований: гранитные частицы, выделенные методом седиментационной сепарации из пылевидной фракции отсевов дробления гранита, представленные фракциями 50–160 мкм, 10–50 мкм, менее 10 мкм и коллоидной.

Предмет исследований: гранулометрический состав, удельная поверхность и морфология (коэффициент удлинения) микро- и наноразмерных частиц алюмосиликатов указанных фракций.

Задачи работы:

- Методом седиментационной сепарации выделить из отсевов дробления гранита фракции с заданными граничными размерами.
- С применением лазерной дифракции определить гранулометрические характеристики, удельную поверхность и коэффициент удлинения частиц дисперсной фракции (10–50 мкм).
- Проанализировать полученные кривые распределения, оценить однородность и воспроизводимость результатов.
- Сопоставить полученные характеристики с литературными данными по требованиям к микронаполнителям цементных бетонов.

Методика исследования

Разделение исходной пылевидной фракции на фракции заданной крупности осуществляли методом седиментации в жидкой среде, основанным на законе Стокса. Скорость осаждения сферической частицы в ламинарном режиме описывается выражением 1:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_0)g}{18\mu_0} \quad (1)$$

где ω_{oc} – скорость осаждения, м/с; d – диаметр частицы, м; ρ – плотность материала частицы (для гранита ≈ 2700 кг/м³); ρ_c – плотность воды, кг/м³; $g = 9,81$ м/с²; μ_c — динамическая вязкость воды, Па·с.

Выражая диаметр частицы через высоту столба жидкости h и время осаждения τ , получают рабочее уравнение для расчёта граничного размера фракции:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu_c h}{(\rho - \rho_c) g \tau}}, \quad (2)$$

Задавая время отстаивания τ при фиксированной высоте h , можно выделить частицы, размер которых не превышает расчётного значения.

Практическая реализация метода (рисунок 1) заключалась в следующем. Навеску исходного порошка пылевидной фракции отсева гранитного щебня помещали в первый сосуд, заливали дистиллированной водой, интенсивно взбалтывали и оставляли в покое. Через 1 мин (расчёт по формуле (2) для высоты столба жидкости даёт граничный размер ~ 50 – 160 мкм) взвесь над осадком сливали во второй сосуд; осадок в первом сосуде высушивали при 105 °С до постоянной массы и получали грубодисперсную фракцию 50 – 160 мкм. Слитую взвесь отстаивали 10 мин; осадок после декантирования верхнего слоя высушивали аналогично — дисперсная фракция 10 – 50 мкм. Оставшуюся взвесь оставляли на 5 – 7 суток; полученный осадок — тонкодисперсная фракция менее 10 мкм (. Осветлённая вода над осадком содержала ультрадисперсные (коллоидные) частицы).

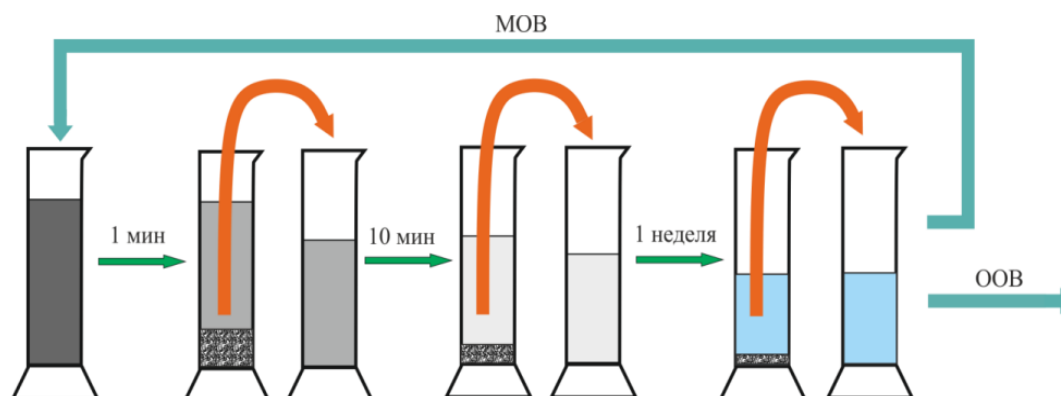


Рис. 1. Принципиальная схема седиментационной сепарации твердых полидисперсных частиц в жидкой среде

Для дальнейшего гранулометрического анализа из дисперсной фракции ($\leq 10\text{--}50$ мкм) были отобраны три параллельные пробы (1 – 3).

Для определения гранулометрического состава и морфологии частиц применялся лазерный анализатор «Анализетте 22 Nano Тес» (Fritsch, Германия) (рис. 2). Принцип метода заключается в измерении углового распределения интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через кювету с суспензией. Крупные частицы рассеивают преимущественно под малыми углами, мелкие — под большими. Размер частиц рассчитывается как диаметр сферы эквивалентного объёма с использованием теории Фраунгофера.



Рис. 2. Прибор «Анализетте 22» Nano Тес

Основные параметры прибора: диапазон измерений от 1 нм до 1000 мкм; параллельный лазерный луч, линза Фурье; разрешение 102 канала. Параметры измерения в работе: диапазон 0,1–207,03 мкм, модель регуляризации *o_medium*, расчёт по Фраунгоферу, температура 25 °С, поглощение 11,00 %, ультразвук включён, длительность 100 сканов, подача насоса 80 %.

Результаты исследований

Гранулометрический состав дисперсной фракции

Внешний вид проб гранитных отсевков дисперсной фракции ($\leq 10\text{--}50$ мкм), их дифференциальные и интегральные кривые распределения по разме-

рам частиц представлены на рисунке 3. Средние показатели гранулометрического состава проб приведены в таблице 1.

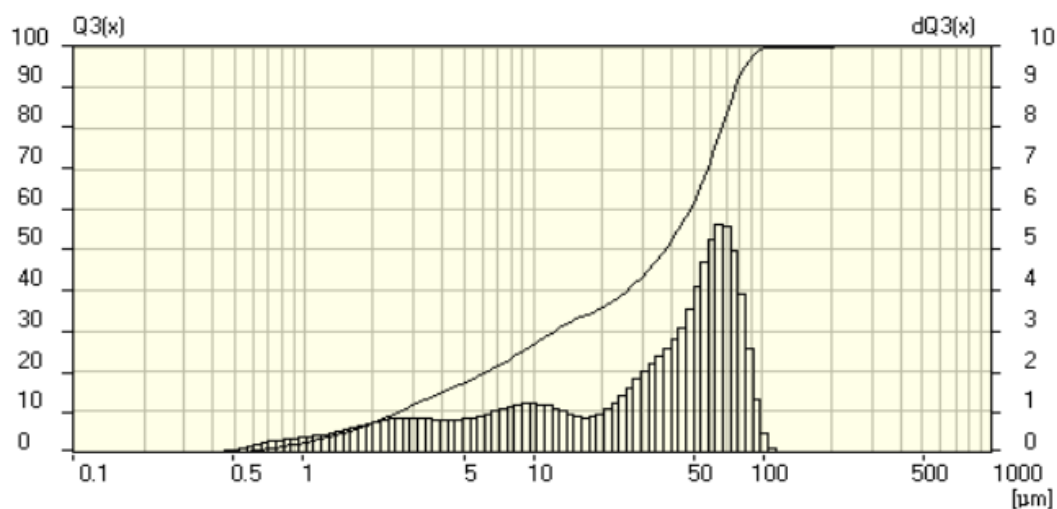


Рис. 3. Дифференциальная и интегральная кривая распределения частиц гранитных отсеков дисперсной фракции ($\leq 10\text{--}50$ мкм)

Таблица 1

Результаты лазерной дифракции проб дисперсной фракции (≤ 50 мкм)

Показатель	Номер пробы		
	1	2	3
Средний объемный диаметр, мкм	38,09	37,30	36,33
Средний арифметический диаметр, мкм	38,087	37,295	36,328
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{см}^3$	7830,21	7938,94	8215,55

Все три пробы демонстрируют близкие средние диаметры (около 36–38 мкм). При пересчете на массу (с учётом плотности гранита $\sim 2,7$ г/см³) удельная поверхность составляет около 2900–3000 см²/г, что соответствует уровню микронаполнителей средней дисперсности.

Интегральные кривые $Q_3(x)$ всех трёх проб показывают, что 90 % частиц имеют размер менее 80–100 мкм; кривые выходят на плато при размерах около 100 мкм, что свидетельствует о полном учёте всех частиц в измеряемом диапазоне.

На дифференциальных кривых $dQ_3(x)$ наблюдается чёткий максимум в области 30–80 мкм. В области менее 5 мкм заметно небольшое «плечо» или до-

полнительный пик, указывающий на присутствие субмикронных и, потенциально, наноразмерных частиц. Близкая форма дифференциальных кривых проб подтверждает однородность гранулометрического состава выделенной дисперсной фракции.

Оценка формы частиц

По результатам измерений, для медианного диаметра $D_{50} = 49,172$ мкм средний коэффициент удлинения составил 1,551. Полученное значение больше единицы указывает на вытянутую (овальную, оскольчатую) форму частиц, что типично для продуктов дробления гранита (рис. 4).

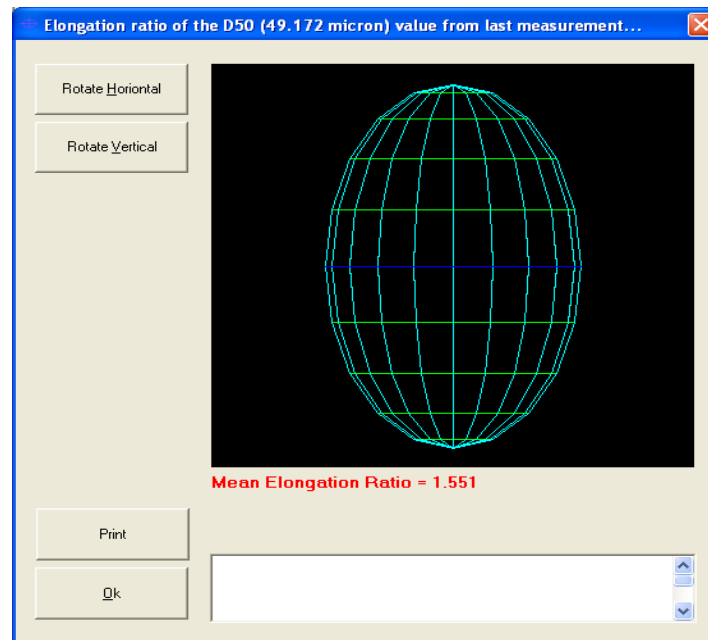


Рис. 4. Форма частиц дисперсной фракции ($\leq 10\text{--}50$ мкм)

Такая форма способствует механическому зацеплению зёрен в цементной матрице, но может несколько увеличивать водопотребность смеси, что согласуется с литературными данными [5, 8].

Результаты ситового анализа

Для сопоставления с данными лазерной дифракции был выполнен ситовой анализ 500 г исходной пылевидной фракции гранитного отсева. Рассев проводили через набор сит с размерами ячеек 4000; 1000; 63 и 50 мкм. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 5.

Анализ результатов показывает, что около 76 % материала сосредоточено во фракциях менее 1000 мкм, при этом максимум приходится на фракции менее 63 мкм. Мелкая фракция (менее 50 мкм) включает частицы, соответствующие дисперсной и тонкодисперсной фракциям, полученным седиментацией. Таким образом, ситовой анализ подтверждает полидисперсный характер гранитного отсева и наличие значительной доли частиц мельче 50 мкм. Что приводит к активной физико-химической роли отмытых данной методикой гранитных отсевок в структурообразовании строительных композитов гидратационного твердения нового поколения.

Таблица 2

Данные ситового анализа исходной пылевидной фракции гранитного отсева

Вид остатка	Остаток на ситах с размером отверстий, мкм			
	4000	1000	63	Прошло через сито № 50
Масса остатка, г	252,4	130	65	52,6
Частный остаток, %	50,48	26	13	10,52
Полный остаток, %	50,48	76	89	100



Рис. 5. Дифференциальная кривая просеивания

Заключение

В работе обоснована актуальность использования отсевок дробления гранита в качестве доступного источника микро- и наноразмерных частиц алюмосиликатов для модифицирования цементных систем. Применение лазерного

анализатора «Анализетте 22» позволило получить детальную картину гранулометрического состава и морфологии частиц, выделенных методом седиментационной сепарации. Установлено, что данные частицы являются полидисперсными, с преобладанием фракции 30–40 мкм, обладают высокой удельной поверхностью и вытянутой формой. Наличие ультрадисперсной составляющей открывает перспективы для реализации наноэффектов в цементных композициях. Полученные результаты создают научно-методическую основу для дальнейших исследований, направленных на создание экономичных и эффективных строительных материалов с использованием техногенного сырья, что соответствует принципам устойчивого развития и ресурсосбережения.

Список литературы

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. и др. Многокомпонентные бетоны с микронаполнителями: структура, свойства, перспективы применения // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 27–33.
2. Корнеев В.А., Кривобородов Ю.Р. Наномодифицированные цементы: получение, свойства, применение // *Цемент и его применение*. 2016. № 3. С. 58–64.
3. Яковлев Г.И., Плеханова Т.А., Первушин Г.Н. и др. Использование отходов камнедробления в производстве строительных материалов: состояние и перспективы // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 8. С. 1173–1185.
4. Peng Y., Zhao B., Zhang L. Pozzolanic reactivity of granite powder and its effect on cement paste microstructure // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 274. Art. 121892. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121892
5. Ramos T.J., Matos A.M., Soares D., et al. Granite quarry waste as a supplementary cementitious material: reactivity and mechanical properties // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 235. P. 1313–1324.
6. Nunes V.A., Borges P.H.R., Bochenek G.F., et al. Microstructure and mechanical properties of cement mortars with granite powder // *Cement and Concrete Composites*. 2020. V. 112. Art. 103657.

7. Петрографический кодекс. Магматические и метаморфические породы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
8. Попов К.Н., Каддо М.Б., Кульков О.В. Оценка активности минеральных добавок по их влиянию на тепловыделение цемента // Строительные материалы. 2018. № 3. С. 44–49.
9. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Методы и приборы для анализа дисперсного состава пылей и порошков. Л.: Химия, 1984. 288 с.
10. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М.: Изд-во МГУ, 2010. 336 с.
11. Лазарев А.В., Ковальская Я.Б. Лазерная дифракция в анализе дисперсных материалов: методические аспекты // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 7. С. 31–37.
12. Yuan P., Tan D., Annabi-Bergaya F. Properties and applications of halloysite nanotubes: recent advances and prospects // Applied Clay Science. 2015. V. 112–113. P. 75–93.
13. Land G., Stephan D. The effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of cement paste // Cement and Concrete Research. 2012. V. 42. P. 1011–1023.
14. Макеев А.И., Кукина О.Б. Исследования продуктов седиментационной сепарации пылевидной фракции гранитного отсева // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы X-й Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов: ТГТУ, 2024. С. 275–280.
15. Макеев А.И., Чернышов Е.М. Пылевидная фракция отсевов дробления гранита как носитель микронаночастиц, участвующих в структурообразовании цементных бетонов // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10. № 4. С. 20–38.
16. Макеев А.И. Отсевы дробления гранита как компонентный фактор формирования структуры бетона. Часть II. Экспериментальные исследования структурообразующего потенциала // Строительные материалы. 2024. № 1-2. С. 59–66.

Refereces

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., et al. Multicomponent concretes with micro-fillers: structure, properties, application prospects // Building materials. 2017. No. 5. pp. 27-33. (in Russian)
2. Korneev V.A., Krivoborodov Yu.R. Nanomodified cements: preparation, properties, application // Cement and its application. 2016. No. 3. pp. 58-64. (in Russian)
3. Yakovlev G.I., Plekhanova T.A., Pervushin G.N., et al. The use of stone crushing waste in the production of building materials: current state and prospects // Bulletin of MGSU. 2020. V. 15. No. 8. pp. 1173-1185. (in Russian)
4. Peng Y., Zhao B., Zhang L. Pozzolanic reactivity of granite powder and its effect on cement paste microstructure // Construction and Building Materials. 2021. V. 274. Art. 121892. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121892
5. Ramos T.J., Matos A.M., Soares D., et al. Granite quarry waste as a supplementary cementitious material: reactivity and mechanical properties // Journal of Cleaner Production. 2019. V. 235. P. 1313–1324.
6. Nunes V.A., Borges P.H.R., Bochenek G.F., et al. Microstructure and mechanical properties of cement mortars with granite powder // Cement and Concrete Composites. 2020. V. 112. Art. 103657.
7. Petrographic Code. Igneous and metamorphic rocks. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. 200 p. (in Russian)
8. Popov K.N., Kaddo M.B., Kulkov O.V. Evaluation of the activity of mineral additives by their effect on the heat release of cement // Building materials. 2018. No. 3. pp. 44-49. (in Russian)
9. Kouzov P.A., Malgin A.D., Scriabin G.M. Methods and devices for analyzing the dispersed composition of dusts and powders. L.: Khimiya, 1984. 288 p. (in Russian)
10. Sergeev G.B. Nanochemistry. Moscow: MSU Publishing House, 2010. 336 p. (in Russian)

11. Lazarev A.V., Kovalskaya Ya.B. Laser diffraction in the analysis of dispersed materials: methodological aspects // *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*. 2015. V. 81. No. 7. pp. 31-37. (in Russian)
12. Yuan P., Tan D., Annabi-Bergaya F. Properties and applications of holloisite nanotubes: recent advances and prospects // *Applied Clay Science*. 2015. V. 112–113. P. 75–93.
13. Land G., Stephan D. The effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2012. V. 42. P. 1011–1023.
14. Makeev A.I., Kukina O.B. Studies of sedimentation separation products of the pulverized fraction of granite screening // *Sustainable development of the region: architecture, construction, transport: materials of the Xth International Scientific and Practical Conference*. Tambov: TSTU, 2024. pp. 275-280. (in Russian)
15. Makeev A.I., Chernyshov E.M. Pulverized fraction of granite crushing screening as a carrier of microparticles involved in the structure formation of cement concretes // *Nanotechnology in construction*. 2018. V. 10. No. 4. P. 20-38. (in Russian)
16. Makeev A.I. Granite crushing screening as a component factor in the formation of the concrete structure. Part II. Experimental studies of the structure-forming potential // *Building materials*. 2024. No. 1-2. pp. 59-66. (in Russian)

Makeev Алексей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, ВГТУ

Кукина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Кудоярова Эвелина Романовна – студент группы бМТ 231 факультета радиотехники и электроники, ВГТУ

Малюков Данил Юрьевич – студент группы бМТ 231 факультета радиотехники и электроники, ВГТУ

Горбылёв Михаил Андреевич – студент группы бМТ 231 факультета радиотехники и электроники, ВГТУ

Шпилевой Дмитрий Александрович – студент группы бМТ 231 факультета радиотехники и электроники, ВГТУ

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКРОПЛАСТИКОВ (ЧАСТЬ 3)

О.Б. Рудаков¹, А.А. Лукин^{2,3}, А.Л. Вебер⁴

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

²*Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия, 454080,
г. Челябинск, проспект Ленина, 75*

³*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследова-
тельский университет), Россия, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76*

⁴*Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,
Россия, 644008, г. Омск, Институтская пл., д. 1.*

**Адрес для переписки: Лукин Александр Анатольевич, e-mail: lukin3415@gmail.com*

Статья посвящена исследованию современных методов электрохимической идентификации и анализа микропластиков в водной среде. Рассматриваются физико-химические свойства микропластиков, факторы, влияющие на их электрохимическое поведение, и перспективы развития соответствующих технологий. Особое внимание уделено параметрам приложения электрического тока, особенностям свойств полимеров и конструкции электрохимических датчиков. Подчёркиваются преимущества электрохимических методов перед традиционными методами анализа, такими как высокая чувствительность, простота и доступность оборудования. Обзор включает описания ключевых экспериментов и разработок в данной области, демонстрируя значимость дальнейшего изучения возможностей электрохимических инструментов для выявления и устранения микропластиковых загрязнений.

Ключевые слова: микропластики, электрохимические методы, идентификация, плотность тока, свойства пластмассы, электрод

O.B. Rudakov¹, A.A. Lukin^{2,3}, A.L. Veber⁴

¹*Voronezh State Technical University, Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya St., 84*

²*South Ural State Agrarian University, Russia, 454080, Chelyabinsk, Lenin Ave., 75*

³*South Ural State University (National Research University), Russia, 454080, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76*

⁴*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Russia, 644008, Omsk, Institutskaya Pl., Bldg. 1*

**Corresponding author: Aleksander A. Lukin, e-mail: lukin3415@gmail.com*

This article explores modern methods for the electrochemical identification and analysis of microplastics in aquatic environments. It examines the physicochemical properties of microplastics, the factors influencing their electrochemical behavior, and prospects for the development of relevant technologies. Particular attention is paid to the parameters of electric current application, the properties of polymers, and the design of electrochemical sensors. The advantages of electrochemical methods over traditional analytical methods, including high sensitivity, simplicity, and the availability of equipment, are highlighted. The review includes descriptions of key experiments and developments in this area, demonstrating the importance of further exploring the potential of electrochemical instruments for the detection and removal of microplastic contaminants.

Keywords: microplastics, electrochemical methods, identification, current density, plastic properties, electrode

Введение

На электрохимические процессы оказывают значительное воздействие ряд переменных: величина приложенного тока (в форме плотности или потенциала), характеристики определяемого вещества, электрохимическая активность используемого электрода, а также состав и свойства электролита. Для эффективного планирования дальнейших исследований в области электрохимического обнаружения и удаления микропластика (МП) из водных сред, требуется тщательный анализ влияния условий проведения эксперимента. В этом блоке будут детально рассмотрены характеристики микропластика, параметры приложенного тока (плотность или потенциал), а также особенности электролита.

Основная часть

Свойства пластиков. Электрохимические свойства пластиков существенно зависят от таких параметров, как габариты, конфигурация, удельный вес и тип полимера. В силу того, что ПВХ проявляет значительно меньшее удельное сопротивление в сравнении с полиэтиленом, он в большей степени подвержен процессам электроосаждения и электроротации. Более того, электроротация облегчает извлечение из воды МП с плотностью, уступающей плотности воды (например, ПЭ) [1].

Оптимальные параметры для удаления МП различных размеров варьируются, что обусловлено уникальными электрическими характеристиками полимеров разных размеров. Для электрокоагуляции мелких МП (20–60 мкм) требуется плотность тока 2,88 мА/см² и рН 4, в то время как для крупных МП (350–1500 мкм) необходима та же плотность тока 2,88 мА/см², но рН 7, что вероятно связано с формированием более крупных пузырьков при нейтральном рН.

Помимо этого, форма МП и наночастиц (НЧ) оказывает влияние на эффективность электрохимического удаления. Волокнистые МП (РР) демонстрируют более высокую эффективность удаления методом электрокоагуляции, чем гранулированные МП (РЕ и РММА). На текущий момент электрохимическое зондирование изучено только для пластиковых сфер, другим формам МП уделяется недостаточно внимания. Важно исследовать электрохимическую идентификацию МП различной формы (например, лист, волокно и пленка) в контексте зависимости электрических характеристик пластиков от их формы [2-4].

Плотность тока

Интенсивность приложенного электрического поля или величина проходящего тока оказывают непосредственное воздействие на успешность протекания реакции. Увеличение плотности тока или повышение напряжения, как правило, облегчает устранение МП за счет механизмов, подобных электрокоагуляции.

В ходе электрокоагуляции/электрофлотации усиленная плотность тока стимулирует формирование гидроксидов металлов (например, $\text{Al}(\text{OH})_3$) и ускоряет выделение коагулирующих агентов из алюминиевого анода. Катод, в свою очередь, при большей плотности тока выделяет больше газообразного водорода. Эти пузырьки содействуют удалению МП и обеспечивают его перенос, адгезируясь к скоплениям частиц.

В альтернативном методе – диэлектрофорезе на базе изолятора – высокая интенсивность напряжения провоцирует агглютинацию частиц, что может снизить эффективность разделения из-за закупорки микроскопических каналов.

Кроме электрохимических аспектов, необходимо принимать во внимание значительное потребление энергии, обусловленное повышенной плотностью тока [5-7].

Электролит

Многочисленные исследования посвящены влиянию pH, сопутствующих веществ и концентрации электролита на электрохимические процессы с участием МП. Более высокая концентрация электролита способствует лучшей проводимости и, следовательно, улучшает электрохимический процесс. В методах измерения на основе Рамановской спектроскопии с подавлением спонтанного излучения (RPS) ионная сила электролита (KCl) оказывает заметное влияние на электрохимический сигнал, при этом при более низких ионных силах наблюдаются проводящие и обратные импульсы. Увеличение концентрации электролита в процессе электрокоагуляции может повысить эффективность удаления МП. Что касается электролита Na_2SO_4 , электрохимические системы проявляют чувствительность к таким факторам, как плотность или потенциал приложенного тока, характеристики аналита, активность электрода и особенности электролита. Для оптимизации будущих исследований в области электрохимической идентификации и удаления МП из водных сред необходимо тщательно изучить влияние экспериментальных условий.

Электроокисление МП сульфат-производными активными формами (SO_4^{4-}) в процессе электроокисления приводит к образованию H_2O_2 , и увеличение

концентрации Na_2SO_4 от 0,007 до 0,03 М способствует заметному улучшению кинетики электролиза. Однако дальнейшее повышение концентрации до 0,06 М не оказывает дополнительного положительного эффекта, возможно, из-за недостаточного образования H_2O_2 .

pH электролита играет ключевую роль в определении характеристик поверхностного заряда, химической структуры и формы различных веществ, включая коагулянты, аналиты и материалы электродов. Рекомендуется использовать растворы, близкие к нейтральному pH, для облегчения образования крупных флоккулов при электрокоагуляции МП. Аналогичные результаты наблюдаются при электрохимическом обнаружении бисфенола А (BPA), где на кислотно-основную диссоциацию BPA влияет pH электролита, что приводит к pH-зависимым изменениям тока и потенциала окисления. С увеличением pH группы $-\text{COOH}$ на многослойных углеродных нанотрубках (МУНТ) становятся более депротонированными, заставляя их действовать как кислотные анионы и отталкивать анионные формы BPA при использовании в качестве сенсора BPA в щелочном растворе (МУНТ- β CD). Следовательно, оптимальным для обнаружения BPA является pH 7,4, близкий к нейтральному.

Ионы металлов (такие как Pb, Ni, Cu и Cr) способны взаимодействовать с естественно состаренными МП посредством поверхностного комплексообразования и электростатической адсорбции. Примечательно, что совместное присутствие МП и ионов металлов способствует удалению последних, не влияя на способность МП к электрокоагуляции. Увеличение концентрации ионов Cl^- не оказывает существенного влияния на эффективность удаления микропластика во время электрокоагуляции. В настоящее время исследования, посвященные роли растворенных органических веществ в электрохимическом удалении МП, ограничены. Для оценки селективности электродов в обнаружении загрязнений, происходящих от МП, в электролит обычно добавляют ионы металлов, анионы и органические вещества. Некоторые малые молекулы (например, мочевиная и аскорбиновая кислоты) и неорганические соединения (например,

KBr, NaNO₂, KCl и NaNO₃) не оказывают заметного влияния. Однако органические вещества, такие как тетрабромбисфенол А (ТВВРА), имеющие общее химическое строение с целевыми загрязнителями (например, ВРА), могут затруднить идентификацию [8-10].

Конструкция электрохимических сенсорных устройств

Разработка электрохимических сенсоров требует внимательного планирования и скрупулезного подбора электродных материалов и компонентов, которые соответствуют намеченному применению. Для обеспечения стабильной работы устройства в заданной среде, все его элементы должны обладать механической прочностью и химической устойчивостью.

После выбора материалов электродов следующим шагом является выбор оптимального метода иммобилизации активного материала на поверхности рабочих электродов. Способ модификации электрода и типы используемых материалов могут оказывать влияние на толщину электрода, адгезию, удельную массу, распределение и равномерность покрытия поверхности.

Различные электроды, включая металлическую пену, проводящую бумагу на основе углерода, стеклоуглерод и стекло ИТО/FTO, могут быть использованы в качестве платформ для электрохимических устройств, применяемых в мониторинге микрочастиц. В данном разделе представлен обзор множества методов нанесения материалов на электродные поверхности. Эти методы направлены на решение вопросов воспроизводимости, совместимости и возможности крупномасштабного производства, что является ключевыми аспектами при создании сенсорных устройств [11-13].

Электрофоретическое осаждение

Электрофоретическое осаждение или EPD, зарекомендовало себя как надежный метод формирования тонких слоев непосредственно на поверхности электродов. Его отличительной чертой является способность создавать равномерные покрытия с контролируемой толщиной. Суть метода заключается в воздействии постоянного электрического поля на подложку, содержащую взвесь осаждаемого материала (см. рис. 1). Электрическое поле, в свою очередь,

способно формировать сложные двух- и трехмерные структуры на поверхности электродов, направляя заряженные частицы в суспензии к электроду с противоположным зарядом.

Метод EPD также применим для осаждения биоматериалов. Варьируя размер частиц, тип растворителя, электрофоретическую подвижность и интенсивность электрического поля, можно создавать пленки с различными характеристиками, включая толщину и однородность. Так, при напряжении 0,2–1,6 В, данный метод использовался для осаждения наночастиц золота различных размеров на стеклянные электроды, покрытые ИТО. В оптимальных условиях были осаждены наночастицы оксидов и сульфидов металлов, таких как медь, железо, кобальт, цинк и титан. Среди углеродных материалов, осаждаемых с использованием напряжения от 2 до 100 В, можно отметить оксид графена, графеновые квантовые точки, углеродные нанотрубки и композиты на их основе. Выбор данных материалов обусловлен их зарядом и подвижностью. Графеновые композиты наносились на кремниевые пластины при более высоких напряжениях (300 В).

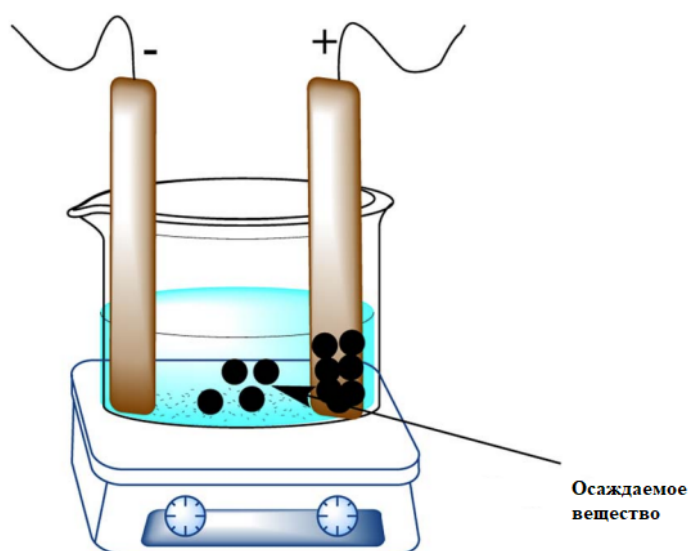


Рис. 1. Схема процесса EPD

Кроме того, методом EPD осаждали металлоорганические каркасы (MOF) для получения однородных пленок с заданной формой и толщиной. Частицы

MOF обладают дефектными участками из-за отсутствия линкеров, что приводит к частичному заряду. При приложении достаточно сильного электрического поля, эти заряды перемещают MOF в направлении противоположно заряженного электрода. Путем диспергирования MOF в толуоле в течение различного времени с использованием EPD, были получены микроузлы на тонких пленках NU-1000, HKUST-1, UiO-66 и Al-MIL-53. Эти пленки демонстрируют хорошее сцепление со стеклянным электродом (FTO) и сохраняют свою кристаллическую структуру. Для обнаружения взрывчатых веществ и ионов Cr^{3+} была получена тонкая пленка MOF Ln-BTC путем диспергирования MOF в CH_2Cl_2 растворе. Электропроводящие MOF в последнее время привлекают значительное внимание в контексте производства тонких пленок для использования в качестве электродных материалов в суперконденсаторах и батареях. Например, при подаче напряжения 0,5 В между электродами в течение 10 минут, нанолиты 2D MOF никель-2,3,6,7,10,11 гексааминотрифенилена ($\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$) прилипают к пенопласту никеля [14].

Послойная сборка

Альтернативным и надежным способом формирования многослойных покрытий на твердых основаниях является послойный метод (LBL). В этом "снизу вверх" подходе, подложка последовательно контактирует с частицами, имеющими противоположный электрический заряд. Путем контроля распределения, толщины и состава слоев, возможно создание прецизионных электродов. В отличие от электрофоретического осаждения (EPD), LBL не требует проводящую подложку. Более того, этот метод позволяет наносить пленки на подложки с различной топографией, что упрощает создание трехмерных микроструктурированных пленок. Технология LBL находит применение в различных процессах, таких как рулонная обработка, распыление, атомизация, магнитная сборка, электроперенос, техника слипания и другие. Выбор метода определяется требованиями конкретного применения и способностью подложки удерживать наносимые материалы. Этот метод предоставляет универсальный подход к внедрению активных материалов на

поверхности электродов для связывания или преобразования целевых веществ. Он подходит для разделения различных типов материалов между слоями, включая металлические наночастицы. Тонкие пленки металлоорганических каркасов (SURMOF) создаются с использованием LBL путем предварительного покрытия носителя самособирающимся монослоем (SAM), с последующим многократным погружением в растворы, содержащие органические лиганды и прекурсоры металлов, с очисткой после каждого погружения (рис. 2). Этот процесс способствует контролируемому формированию точно выровненных и однородных листов MOF для газовых измерений и электрохимического катализа.

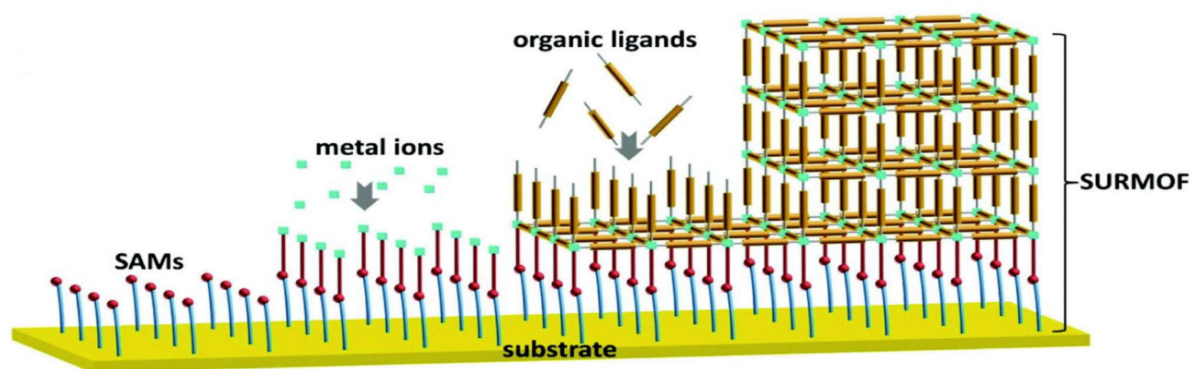


Рис. 2. Иллюстрация формирования пленки SURMOF с помощью сборки LBL

Кроме того, LBL позволяет наносить металлические наночастицы (МНЧ) на твердые подложки, обеспечивая точный контроль над плотностью и распределением НЧ. Электростатическое взаимодействие применяется для осаждения наночастиц золота (Au) на графен, что облегчает захват инжектированных электронов от анализируемого вещества. Сборка LBL может быть использована для создания подложек с индивидуально настраиваемым усиленным комбинационным рассеянием света (SERS), путем регулировки размера Au NP и толщины слоя, для использования в сенсорных приложениях. Сокращение времени производства может быть достигнуто путем автоматизации процесса сборки с использованием этого метода [15,16].

Заключение

Микрочастицы пластика повсеместно встречаются в нашем мире, от арктических регионов до глубоководных зон океана. Многочисленные научные работы посвящены изучению рисков, которые эти частицы представляют для экосистемы и здоровья человека. В данном обзоре рассматривается текущее состояние электрохимических подходов к определению наличия и концентрации микропластика. Чтобы продемонстрировать разнообразие областей применения электрохимии как альтернативного инструмента в этой сфере, приводятся конкретные примеры.

Использование доступных и хорошо зарекомендовавших себя электрохимических техник позволяет ускорить процесс обнаружения микропластика и определения его концентрации в различных образцах. Эти техники дают возможность проводить масштабные исследования для оценки концентраций микропластика, а также для мониторинга потенциальных угроз, связанных с присутствием этих загрязнителей в окружающей среде. Более того, они могут служить дополнением к существующему лабораторному оборудованию.

К достоинствам электрохимических методик можно отнести высокую чувствительность, экономичность и простоту применения. Современный рынок предлагает широкий выбор портативных устройств и одноразовых электродов, которые создают отличную базу для эффективного, доступного и локального выявления загрязнений в удаленных лабораториях.

Несмотря на достигнутый прогресс, для успешного переноса этих технологий из лабораторных условий в реальную практику требуются дальнейшие усовершенствования. Внедрение электрохимических технологий значительно упростило формирование первичных знаний о микропластике. Таким образом, электрохимические методы представляют собой ценные инструменты, способные коренным образом изменить наше понимание микропластика в окружающей среде и облегчить его идентификацию и удаление.

Список литературы / References

1. Eerkes-Medrano D., Thompson R.C., Aldridge D.C. Microplastics in fresh-water systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // *Water Res.* 2015. No. 75. P. 63–82.
2. Pollard M., Hunsicker E., Platt M. A tunable three-dimensional printed microfluidic resistive pulse sensor for the characterization of algae and microplastics // *ACS Sensors.* 2020. No. 5(8). P. 2578-2586.
3. Brazey B., Cottet J., Bolopion A., et al. Impedance-Based Real-Time Position Sensor for Lab-on-a-Chip Devices // *Lab Chip.* 2018. No 18. P. 818–831.
4. Okoffo E.D., Ribeiro F., Brien J.W.O., et al. Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry // *Sci. Total Environ.* 2020. No. 71(5). P. 136924.
5. Miller M.E., Kroon F.J., Motti C.A. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. No. 12(3). P. 6–18.
6. Medrano D., Leslie H.A., Quinn B. Microplastics in drinking water: A review and assessment // *Current Opinion in Environmental Science and Health.* 2019. No. 7. P. 69–75.
7. Li J., Liu H., Paul Chen J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // *Water Res.* 2018. No. 137. P. 362–374.
8. Collard F., Gilbert B., Eppe G., et al. Detection of Anthropogenic Particles in Fish Stomachs: An Isolation Method Adapted to Identification by Raman Spectroscopy // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2015. No. 69. P. 331–339.
9. Shimizu K., Sokolov S.V., Kätelhön E., et al. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // *Electroanalysis.* 2017. No. 29. P. 2200–2207.
10. Shimizu K., Sokolov S.V., Kätelhön E., et al. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // *Electroanalysis.* 2017. No. 29. P. 2200–2207.
11. Elert A.M., Becker R., Duemichen E., et al. Comparison of Different Methods for MP Detection: What Can We Learn from Them, and Why Asking the

Right Question before Measurements Matters? // Environ. Pollut. 2017. No. 231. P. 1256–1264

12. Löder M.G.J., Kuczera M., Mintenig S., et al. Focal Plane Array Detector-Based Micro-Fourier-Transform Infrared Imaging for the Analysis of Microplastics in Environmental Samples. Environ // Chem. 2015. No. 12. P. 563–581

13. Schuldt T., Gkatzelis G.I., Wesolek C., et al. Electrochemical sensors onboard a Zeppelin NT: In-flight evaluation of low-cost trace gas measurements // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2022. No. 20. P. 8-22.

14. Colson B.C., Michel A.P.M. Flow-Through Quantification of Microplastics Using Impedance Spectroscopy // ACS Sensors. 2021. No. 6(1). P. 238-244

15. Cabernard L., Roscher L., Lorenz C., et al. Comparison of Raman and Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quantification of Microplastics in the Aquatic Environment // Environ. Sci. Technol. 2018. No. 52. P. 13279–13288.

16. Zhang X., et al. Rapid Monitoring Approach for Microplastics Using Portable Pyrolysis-Mass Spectrometry // Anal. Chem. 2020. No. 92. P. 4656–4662.

Рудаков Олег Борисович – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Лукин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пищевые и биотехнологии, ЮУрГУ (НИУ)

Вебер Анна Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии агротехнологического факультета, Омский ГАУ

УДК 547.1:547-316

**ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПОРТАТИВНЫМИ
ДЕТЕКТИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ НА СОДЕРЖАНИЕ
ФОРМАЛЬДЕГИДА И ДРУГИХ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Е.А. Хорохордина^{}, О.Б. Рудаков*

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

**Адрес для переписки: Хорохордина Елена Алексеевна, e-mail: chorochordin@mail.ru*

Проблема загрязнения воздуха замкнутых помещений продуктами деструкции и остаточными мономерами полимерных композитов остается одной из ключевых в области химического материаловедения и экологической безопасности. В работе представлены результаты сравнительного физико-химического анализа воздушной среды на содержание формальдегида (ФР) и суммы летучих органических соединений (ЛОС) на объектах различного функционального назначения: в химической лаборатории, офисном помещении после ремонта, салоне нового автомобиля и на фоновой территории (лесной массив). Мониторинг осуществлялся с применением портативного газоаналитического оборудования, работающего на принципе полупроводникового сенсора и диффузионного пробоотбора. Выявлены корреляционные зависимости между уровнем насыщенности пространства полимерными и композиционными материалами (включая лабораторную мебель, покрытия, реактивы) и концентрацией экотоксикантов. Проведена статистическая обработка результатов, относительная погрешность измерений не превысила $\pm 5\%$, что верифицирует надежность метода экспресс-диагностики деструкционных процессов в материалах.

Ключевые слова: формальдегид, летучие органические соединения, полимерные материалы, десорбция, химическая лаборатория, газовая сенсорика, воздушная среда.

**EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE AIR ENVIRONMENT BY PORTABLE DETECTING
DEVICES FOR THE CONTENT OF FORMALDEHYDE AND OTHER FLUOROUS
ORGANIC COMPOUNDS**

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

**Corresponding author: Elena A. Khorokhordina, e-mail: chorochoordin@mail.ru*

The issue of indoor air pollution by degradation products and residual monomers of polymer composites remains a key challenge in chemical materials science and environmental safety. This paper presents the results of a comparative physicochemical analysis of air for formaldehyde and total volatile organic compounds in facilities of various functional purposes: a chemical laboratory, a renovated office space, a new car interior, and a background area (forest). Monitoring was carried out using portable gas analytical equipment operating on the principle of a semiconductor sensor and diffusion sampling. Correlation dependencies were identified between the saturation level of the space with polymer and composite materials (including laboratory furniture, coatings, and reagents) and the concentration of ecotoxicants. Statistical processing of the results was performed; the relative measurement error did not exceed $\pm 5\%$, which verifies the reliability of the method for rapid diagnostics of degradation processes in materials.

Keywords: formaldehyde, volatile organic compounds, polymer materials, desorption, chemical laboratory, gas sensors, air environment.

Введение

Интенсивное развитие химической технологии полимеров и композиционных материалов в строительной и мебельной отраслях привело к фундаментальному изменению состава внутренней среды помещений. С точки зрения физической химии поверхностных явлений и механики материалов, любое твердое тело, содержащее низкомолекулярные фракции, является потенциальным источником эмиссии. Современные герметичные конструкции, призванные обеспечить энергоэффективность зданий, одновременно ограничивают кратность воздухообмена, что провоцирует аккумуляцию химических поллютантов до концентраций, в разы превышающих фоновые значения атмосферного воздуха [1, 2].

Особую опасность представляет формальдегид (ФР) – бесцветный газ с резким запахом, имеет выраженные мутагенные свойства, относящийся к пер-

вому классу опасности. С позиций химии материалов, его присутствие в воздухе помещений обусловлено в первую очередь деструкцией карбамидо- и фенолформальдегидных связующих, широко применяемых при производстве древесно-стружечных (ДСП) и древесно-волоконистых плит (ДВП), фанеры, а также теплоизоляционных пенопластов [3, 4]. Механизм выделения ФР включает обратимый гидролиз отвержденной смолы под действием сорбированной влаги воздуха, что описывается кинетическими кривыми, зависящими от температуры и относительной влажности. Параллельно с этим, широкий спектр летучих органических соединений (ЛОС) - толуол, ксилолы, этилбензол, ацетон, фенол - мигрирует из лакокрасочных покрытий, клеевых составов и пластификаторов поливинилхлоридных изделий (линолеумов, натяжных потолков, оконных профилей) [5, 6].

В условиях химической лаборатории к стандартным строительным источникам загрязнения добавляется специфический фактор - наличие большого количества органических растворителей, кислот и реактивов, которые даже в закрытых склянках и при работающей вентиляции создают агрессивный диффузионный фон. Кроме того, лабораторная мебель часто выполнена из химически стойких, но эмитирующих мономеры полимерных композитов.

Традиционные методы контроля, такие как газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием или высокоэффективная жидкостная хроматография, требуют сложной пробоподготовки, дорогостоящего оборудования, грамотного специалиста и не предназначены для скрининговых измерений. Альтернативой служат методы твердотельной сенсорики, реализованные в портативных детекторах, которые позволяют в режиме реального времени оценить интегральный показатель загрязнения [7, 8].

Целью данной работы явилось установление физико-химических закономерностей распределения ФР и ЛОС в помещениях с различной материальной насыщенностью, включая химическую лабораторию как объект повышенного техногенного риска.

Экспериментальная часть

Объекты и методы исследования

Характеристика объектов мониторинга. Для получения репрезентативных данных были выбраны четыре зоны, кардинально различающиеся по генезису химической нагрузки:

1. **Химическая лаборатория (учебно-исследовательская).** Помещение площадью 40 м², насыщенное лабораторной мебелью на основе ДСП и полипропилена, вытяжными шкафами, покрытиями пола из ПВХ. В воздушной среде присутствуют следы растворителей (ацетон, гексан, этанол), работа с которыми проводилась за сутки до измерений при неработающей принудительной вентиляции. Объект моделирует производственную среду с множественными источниками органических поллютантов.

2. **Офисное помещение (постремонтное состояние).** Комната площадью 25 м². Внутренняя отделка включала виниловые обои на флизелиновой основе, натяжной потолок из ПВХ-пленки, ламинированный пол, новую корпусную мебель из ЛДСП. Срок завершения ремонтных работ – 7 дней до момента измерений, что соответствует пику эмиссии остаточных растворителей.

3. **Салон легкового автомобиля (Kia Rio, 2025 года выпуска).** Закрытый объем (около 3 м³) с преобладанием полиуретановых, полипропиленовых и ABS-пластиковых элементов отделки. Замеры проводились при повышенной температуре (+30 °C) для оценки термостимулированной десорбции.

4. **Фоновая зона (рекреационная).** Участок лесного массива с минимальным антропогенным воздействием, используемый для определения базового уровня сигнала прибора и естественного фона летучих метаболитов растительности.

Аппаратурное оформление и методика измерений. Количественная оценка содержания ФР и ЛОС в воздушной среде проводилась при помощи портативного мультигазового детектора Professional «AIR TESTER WP6900». Принцип действия работы на приборе подробно рассмотрен [9] и на блок-схеме. Диапазон регистрируемых концентраций ФР составляет 0,001–1,999 мг/м³, для ЛОС - 0,001–9,999 мг/м³. Пробоотбор - диффузионный, что исключает погрешности, связанные с ас-

пирацией и десорбцией с сорбентов. В рамках данной работы для унификации данных и повышения достоверности статистической обработки на каждом объекте (включая уличный фон) выполнялось по 5 параллельных замеров ($n=5$; $P=0,95$) на уровне дыхательного пояса (1,5 м от уровня пола). В химической лаборатории контрольные точки были удалены от вытяжных шкафов для регистрации фоновой концентрации в зоне дыхания сотрудников.

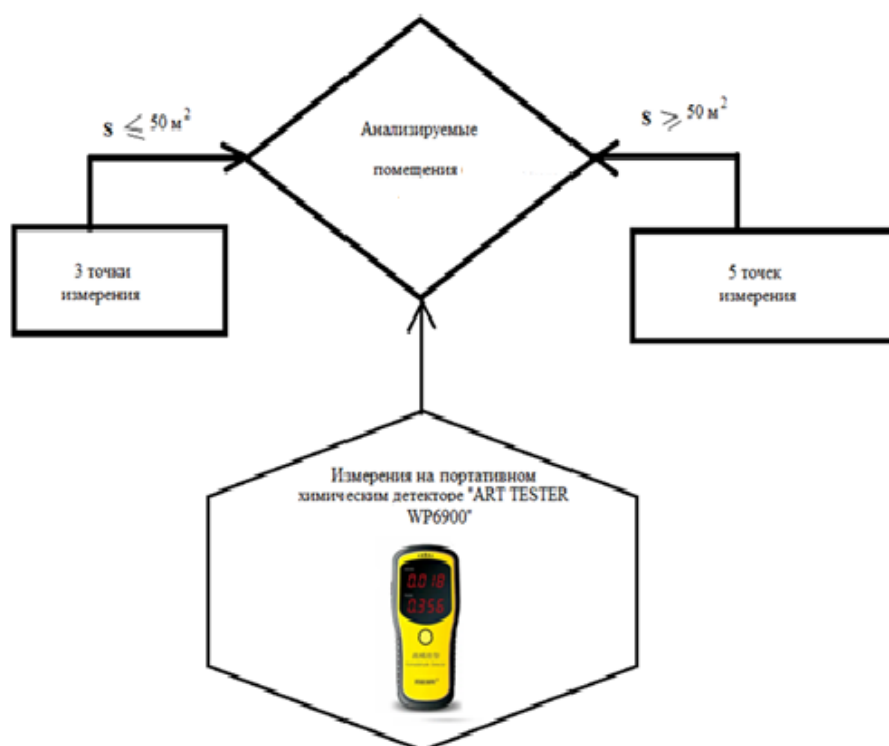


Рис. 1. Блок-схема принципа работы на портативном детекторе Professional «AIR TESTER WP6900»

Результаты и их обсуждение

Усредненные результаты измерений, а также значения относительной погрешности эксперимента (W , %) сведены в таблицу. Метрологическая оценка показала высокую сходимость данных, что подтверждает применимость портативной сенсорики для задач химической экспертизы.

Анализ данных таблицы демонстрирует значительную дифференциацию уровня химической контаминации в зависимости от специфики помещения.

Усредненные показатели загрязнения воздуха формальдегидом и летучими органическими соединениями в исследуемых локациях (n=5; P=0,95)

Объект исследования	Тип нагрузки	Концентрация НСНО, мг/м ³	Концентрация ЛОС, мг/м ³	Параметры среды (температура / влажность)	W, %
Химическая лаборатория	Техногенно-химическая	0,110	7,93	24°C / 58%	1,8
Офис (постремонтный)	Строительно-полимерная	0,048	1,95	23°C / 55%	2,6
Салон автомобиля	Транспортно-полимерная	0,095	4,10	30°C / 40%	2,0
Лесной массив	Природный фон	0,003	0,12	22°C / 65%	4,1

Химическая лаборатория как источник множественной эмиссии.

В химической лаборатории зафиксирована концентрация формальдегида (0,110 мг/м³) более чем в 10 раз превышает среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКс.с.), составляющую согласно [10] всего 0,01 мг/м³. В лаборатории генезис загрязнения носит комбинированный характер. Помимо мебельных плит, в эмиссию формальдегида вносят вклад дезинфицирующие средства и фиксаторы биоматериалов.

Гораздо более показательным для данного объекта является уровень ЛОС – 7,93 мг/м³. Это значение находится в критической зоне (экстремально опасный уровень > 3 мг/м³). Химическая природа данного превышения связана с присутствием остаточных паров органических растворителей (ацетон, толуол, изопропиловый спирт), которые десорбируются с поверхностей лабораторного оборудования, химической посуды и одежды, даже несмотря на предварительное проветривание. Данный факт доказывает высокую сорбционную емкость пористых полимерных материалов, которые аккумулируют ЛОС, а затем медленно выделяют их в окружающую среду. Высокая температура (24 °C) и влажность (58 %) способствуют интенсификации процессов объемной диффузии и гидролитической деструкции адгезивов.

Анализ состояния офисного и автомобильного микроклимата.

В офисном помещении содержание формальдегида составило $0,048 \text{ мг/м}^3$, что практически равно максимально разовой ПДК ($0,05 \text{ мг/м}^3$), но почти в 5 раз превышает среднесуточный норматив. Уровень ЛОС ($1,95 \text{ мг/м}^3$) классифицируется как потенциально опасный. Это классический пример «синдрома новой мебели», когда с поверхности ламинированных плит и клеевых швов происходит диффузия остаточного стирола, фенола и формальдегида. Конвективные потоки, создаваемые работающей оргтехникой, способствуют равномерному распределению поллютантов по объему помещения.

Салон нового автомобиля является моделью экстремально малого замкнутого объема. Прогрев корпуса солнечной радиацией до $30 \text{ }^\circ\text{C}$ резко увеличивает кинетическую энергию молекул пластификаторов, мигрирующих из поливинилхлоридных и полиуретановых деталей интерьера. Концентрация ФР составила $0,092 \text{ мг/м}^3$, а ЛОС – $4,10 \text{ мг/м}^3$, что указывает на активный процесс «fogging» (запотевания стекол органическими конденсатами) в начальной стадии. Такая среда характеризуется высокой химической агрессивностью по отношению к слизистым оболочкам человека.

Сравнительная динамика и метрологическая надежность. Фоновая зона (лесной массив) демонстрирует минимальные значения ($0,003 \text{ мг/м}^3$), что подтверждает отсутствие значимых техногенных источников, хотя природные терпены и изопрен, выделяемые хвойными породами, формируют базовый уровень ЛОС в $0,12 \text{ мг/м}^3$.

С точки зрения физической химии, прослеживается четкая закономерность: суммарная концентрация ЛОС растет пропорционально плотности размещения полимерных изделий в единице объема и обратно пропорциональна кратности воздухообмена. Рассчитанная относительная погрешность измерений (W) во всех точках не выходит за пределы $\pm 5 \%$, достигая максимума ($4,1 \%$) на открытом воздухе из-за нестабильности воздушных потоков. Низкие значения погрешности в помещении лаборатории ($1,8 \%$) и офиса ($2,6 \%$) доказывают состоятельность использования полупроводниковых сенсоров для мониторинга качества материалов и среды, несмотря на их известную перекрестную чувствительность.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что эксплуатационные характеристики полимерных и композиционных материалов неразрывно связаны с процессами их физико-химической деструкции и эмиссии низкомолекулярных соединений. Портативный детектор на основе металлоксидного сенсора продемонстрировал достаточную селективность и высокую точность для экспресс-оценки состояния воздушной среды (относительная ошибка < 5 %).

Выявлено, что насыщенность помещений химическими реактивами и лабораторной мебелью (объект «Лаборатория») создает комбинированный фон ЛОС, превышающий безопасный порог более чем в 15 раз, с пиковыми значениями до 7,93 мг/м³, что сопоставимо с промышленными производствами и требует строгого соблюдения режима вентиляции. В жилых и офисных пространствах ведущим фактором риска остается «свежий ремонт», при котором концентрация формальдегида (0,048 мг/м³) достигает границы максимально разовой ПДК. Рост температуры среды на 10°С способствует усилению миграции пластификаторов в салонах транспортных средств. Полученные данные представляют практический интерес для гигиенической сертификации строительных материалов и организации безопасного технологического процесса в учреждениях химического профиля.

Список литературы

1. Волкова Н.Г., Цешковская Е.Ю. Экологические аспекты микроклимата жилых и общественных зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 4 (28). С. 63–73.
2. Макс А.А., Евдошенко В.С., Загороднов С.Ю. Проблема безопасности жилых помещений в условиях использования строительных материалов с полимерными компонентами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 1-8. С. 2065–2069.
3. Дедкова Л.А., Лисецкая Л.Г. Эмиссия формальдегида в воздухе закрытых помещений // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2011. № 3 (79), Часть 2. С. 76–79.

4. Санитарно-гигиеническая оценка полимерных и полимерсодержащих строительных материалов и конструкций, предназначенных для применения в строительстве жилых, общественных и промышленных зданиях: метод. указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 40 с.
5. Хороходина Е.А., Рудаков О.Б. Экспрессные методы контроля качества и безопасности технических материалов. Воронеж: ВГТУ, 2017. 103 с.
6. Румянцева Г.И. Гигиена: учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. 607 с.
7. Малышева А.Г., Калинина Н.А., Юдин С.М. Химическое загрязнение воздушной среды жилых помещений как фактор риска здоровья населения // Анализ риска здоровья. 2022. № 3. С. 72–78.
8. Чубирко М.И., Степкин Ю.И., Пичужкина И.М. Факторы риска внутри-жилищной среды для здоровья населения // Гигиена и санитария. 2005. № 1. С. 11–13.
9. Хороходина Е.А., Рудаков О.Б. Оценка загрязненности воздуха жилых и общественных объектов портативным детектором // Вода: химия и экология. 2005. № 2. С. 12-13.
10. О внесении изменения № 10 в ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»: постановление Гл. гос. сан. врача РФ от 7.04.2014 г. № 27. Москва, 2014.

References

1. Volkova N.G., Tseshkovskaya E.Yu. [Ecological aspects of microclimate in residential and public buildings] // *Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii* [Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies]. 2019. V. 4(28). P. 63–73. (In Russian)
2. Maks A.A., Evdoshenko V.S., Zagorodnov S.Yu. [The problem of residential safety when using polymer-containing building materials] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2011. V. 13(1-8). P. 2065–2069. (In Russian)
3. Dedkova L.A., Lisetskaya L.G. [Formaldehyde emission in indoor air] // *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii med-*

itsinskikh nauk [Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences]. 2011. V. 3(79). Part 2). P. 76–79. (In Russian)

4. *Sanitarno-gigienicheskaya otsenka polimernykh i polimersoderzhashchikh stroitel'nykh materialov i konstruktsiy, prednaznachennykh dlya primeneniya v stroitel'stve zhilykh, obshchestvennykh i promyshlennykh zdaniyakh: metodicheskie ukazaniya* [Sanitary and hygienic assessment of polymer and polymer-containing building materials and structures intended for use in residential, public and industrial buildings: Guidelines]. Moscow: Federal Center of State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia; 2004. 40 p. (In Russian)

5. Khorokhordina E.A., Rudakov O.B. *Ekspressnye metody kontrolya kachestva i bezopasnosti tekhnicheskikh materialov* [Rapid methods for quality control and safety of technical materials]. Voronezh: VGTU; 2017. 103 p. (In Russian)

6. Rumyantseva G.I. *Gigiena: uchebnik* [Hygiene: Textbook]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: GEOTAR-Media; 2009. 607 p. (In Russian)

7. Malysheva A.G., Kalinina N.A., Yudin S.M. Chemical pollution of residential air as a population health risk factor // *Health Risk Analysis*. 2022. No. 3. P. 72–78. DOI: 10.21668/health.risk/2022.3.07 (In Russian)

8. Chubirko M.I., Stepkin Yu.I., Pichuzhkina I.M. [Risk factors of the indoor environment for public health] // *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2005. No. 1. P. 11–13. (In Russian)

9. Khorokhordina E.A., Rudakov O.B. Assessment of air pollution in residential and public facilities using a portable detector // *Water: Chemistry and Ecology*. 2005. No. 2. P. 12-13. (In Russian)

10. [On Amendment No. 10 to GN 2.1.6.1338-03 "Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Pollutants in the Atmospheric Air of Populated Areas": Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 27 of April 7, 2014]. Moscow; 2014. (In Russian)

Хорохордина Елена Алексеевна – канд. хим. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой химии и химической технологии материалов, ВГТУ

УДК 504.05

ЯВЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ. ЧАСТЬ 2

О.М. Тепоян, С.Г. Колюкаева, В.В. Корнеева

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

**Адрес для переписки: Тепоян Оганес Мкртчичевич, E-mail: Oteroian2006@gmail.com*

В статье рассмотрено явление светового загрязнения в условиях современной городской среды, в частности, на примере города Воронежа. Проанализированы основные виды и источники светового загрязнения, такие как уличное освещение, архитектурная подсветка, рекламные конструкции, промышленные и транспортные объекты. Исследовано влияние избыточного искусственного освещения на экологическое состояние города, здоровье населения, биоритмы живых организмов и энергопотребление.

Проведена сравнительная характеристика подходов к снижению светового загрязнения в крупных мировых городах, включая Париж и Лондон. Выявлены ключевые меры по минимизации негативного воздействия: законодательное регулирование, внедрение энергоэффективных технологий, использование теплых спектров освещения и интеллектуальных систем управления светом. Предложены рекомендации по адаптации успешного международного опыта для российских городов, в том числе Воронежа.

Ключевые слова: световое загрязнение, городская среда, экология, искусственное освещение.

THE PHENOMENON OF LIGHT POLLUTION. PART 2

O. M. Teroian, S. G. Kolyukaeva, V. V. Korneeva

**Corresponding author: Oganess M. Tepoian, e-mail: Otepoian2006@gmail.com*

The phenomenon of light pollution in the modern urban environment is studied, in particular, using the example of the city of Voronezh. The main types and sources of light pollution, such as street lighting, architectural lighting, advertising structures, industrial and transport facilities, are analyzed. The influence of excessive artificial lighting on the ecological state of the city, public health, biorhythms of living organisms and energy consumption is considered.

A comparative characteristic of approaches to reducing light pollution in major global cities, including Paris and London, has been carried out. Key measures to minimize the negative impact have been identified: legislative regulation, the introduction of energy-efficient technologies, the use of warm lighting spectra and intelligent light control systems. Recommendations on adapting successful international experience for Russian cities, including Voronezh, are proposed.

Keywords: light pollution, urban environment, ecology, artificial lighting.

Исследование явления светового загрязнения (г. Воронеж)

Объект исследования – город Воронеж как крупный современный административный, культурный и промышленный центр, в котором активно развивается система наружного и архитектурного освещения.

Предмет исследования – уровень светового загрязнения в городе Воронеж, его возможные источники, влияние на экологическое состояние и качество внутригородской среды, а также возможные пути снижения светового загрязнения на основе анализа опыта других крупных административных центров.

Город Воронеж является крупным административным, промышленным и культурным центром Центрального федерального округа России. Структура его развития включает историческую застройку и современные живые массивы, стремительно развивающиеся на окраинах. Это разнообразие напрямую влияет на организацию городской системы освещения.

Центральная часть Воронежа характеризуется достаточно плотной застройкой, узкими улицами и значительным количеством памятников архитек-

туры. Здесь сосредоточены административные здания, культурные учреждения и места массового отдыха. Для создания эстетического облика активно используется архитектурно-художественная подсветка фасадов, памятников, мостов и набережных. Особо ярко освещены такие объекты, как Чернавский мост, Адмиралтейская площадь, проспект Революции и площадь Ленина.

В новых жилых микрорайонах (таких как Северный, Олимпийский, Подгорное, Шилово) преобладает современная система освещения улиц, здесь используются светодиодные лампы с отражателями. Но все же нередко уровень освещенности превышает нормативный, а светильники направлены не на дорогу или тротуар, а частично вверх или в стороны. Это способствует дополнительному рассеиванию света.

Также значительную роль в формировании светового загрязнения играют рекламные вывески, витрины торговых помещений и автозаправочные станции, работающие в круглосуточном режиме. Все это создает постоянную засветку в ночное время, особенно вдоль крупнейших транспортных магистралей (Московский проспект, Ленинский проспект, проспект Революции и др.).

К тому же в Воронеже наблюдается неравномерность освещения. Так центральные районы и магистрали избыточно освещены, в то время как отдельные дворовые территории и пешеходные зоны остаются мало освещенными. Это указывает, что в городе отсутствует комплексный подход к световому планированию.

Таким образом, особенности городской застройки Воронежа - сочетание исторических и современных зон, массовое использование подсветки и наружной рекламы, а также отсутствие баланса в распределении источников света. Это создает предпосылки для повышения уровня светового загрязнения в будущем и требует разработки многоуровневой программы по рациональному использованию освещения в городской среде.

Основные источники избыточного освещения в Воронеже

К основным источникам избыточного освещения в Воронеже относятся следующие.

Уличное и дорожное освещение. Вдоль основных магистралей – Московского проспекта, Ленинского проспекта, улицы 9 Января, проспекта Патриотов – используется большое количество мощных светильников, направленных не только на дорожное покрытие, но и в стороны. В некоторых районах применяется устаревшее оборудование с низким КПД и без экранирующих щитов, что усиливает утечку света вверх.

Архитектурная и декоративная подсветка. Центральная часть города (площадь Ленина, проспект Революции, Адмиралтейская площадь, мосты через водохранилище) активно подсвечивается в вечернее и ночное время суток. Хоть эта подсветка и придает городу эстетическую привлекательность, ее часто реализуют с нарушением норм освещенности.

Рекламные конструкции. Результаты полевых измерений уровней освещенности на некоторых улицах Воронежа представлены в таблице 1. Полученные значения варьируются в пределах от 2 до 36 лк. На основе полученных данных можно сделать качественную и количественную оценку световой среды города.

Таблица 1

Результаты полевых измерений уровней освещенности

Адрес	Lx	Адрес	Lx
пр-т Революции, 38	36	Саратовская ул., 15	3
Театральная ул., 36	30	ул. Чехова, 29	5
Кольцовская улица, 35	35	ул. Чапаева, 52А	12
ул. 20-летия Октября, 84, к2	28	ул. Челюскинцев, 101Б	22
Московский пр-т, 14	20	Университетская пл., 1	19
ул. 45-й Стрелковой Дивизии, 259/6	22	ул. Карла Маркса, 2	17
Газовая ул., 27	14	ул. Софьи Перовской, 6	14
Газопроводный пер., 34	5	Ленинский пр-т, 1Д	24
Газовый пер., 15Л	22	Костромская ул., 13	8
ул. Машиностроителей, 88	19	ул. Туполева, 13	3
Дорожная улица, 19Б	19	Полтавский пер., 47	7
ул. Героев Сибириков, 14В	25	ул. Остужева, 6	27
Рубежная ул., 36	8	ул. Загородского, 1	26
Московский пр-т, 125	31	ул. Кораблинова, 26	4
ул. Шишкова, 72	21	ул. И. Туркенича, 29	3
Краснодонская ул., 28	2	Поселковая ул., 67	2
ул. Изобретателей, 73	11	Ударная ул., 48	7
ул. Космонавтов, 52	9	ул. Суворова, 65	11

Статистическая сводка (рис.1):

- число замеров – 38 точек
- минимальное значение – 2 лк (Краснодонская ул., 28, Поселковая ул., 67)
- максимальное значение – 36 лк (проспект Революции, 38)
- среднее (арифметическое) значение по всем точкам =16,05 лк.

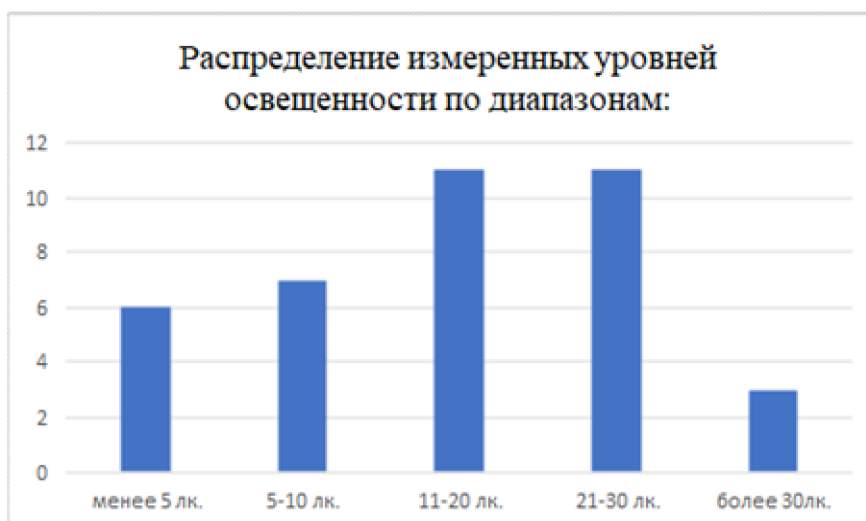


Рис. 1. Распределение измеренных уровней освещенности по диапазонам

К точкам с наибольшим уровнем освещенности (более 24 лк.) относятся участки, преимущественно расположенные в центре города или вдоль крупных магистралей. Уровни свыше 24-30 лк. для городских улиц на многих участках превышают потребности пешеходов и создают чрезмерный световой фон, способствующий формированию “светового купола” над городом и увеличению светового загрязнения.

Большая часть точек (11 точек в диапазоне 11-20 лк. и 11 точек в диапазоне 21-30 лк.) демонстрируют уровни, ближе к нормативным рекомендациям для городских улиц и магистралей (обычно 10-20 лк. для жилых и 20-30 лк. для центральных улиц). Примеры: Московский проспект, 14 – 20 лк.; улица 20-летия Октября, 84к2 – 28 лк.; улица 45-й Стрелковой Дивизии, 259/6 – 22 лк.

Также в ходе замеров выявлены точки с низкой освещенностью, угрожающей безопасности и комфорту пешеходов и автомобилистов:

Краснодонская ул., 28; Поселковая ул., 67; Улица Ивана Туркенича, 29; Саратовская ул., 15; Улица Туполева, 13; а также несколько других точек с значениями в диапазоне 5-10 лк.

Недостаток освещенности в данных местах снижает видимость пешеходов и дорожных препятствий, повышает риск дорожно-транспортных происшествий и делает улицы менее комфортными для вечерних прогулок и поездок.

Выводы и рекомендации

1. Неоднородность световой среды.

Полученные данные указывают на значительную неоднородность освещенности в городе. Это указывает на отсутствие единой политики в отношении организации освещения и зонального подхода к освещению.

2. Центральные магистрали как основные источники светового загрязнения.

Наибольшее значение освещенности сосредоточены на центральных проспектах и улицах. Именно здесь формируется основной городской световой фон, увеличивая уровень светового загрязнения.

3. Необходимость выравнивания уровня освещенности.

Для улучшения ситуации рекомендуется:

- Привести освещенность в жилых и пешеходных зонах к рекомендуемым значениям 5-15 лк. и 15-25 лк. для магистралей, где этот уровень оправдан [1].
- Уменьшить яркость в центральных зонах, где значения превышают фактическую необходимость (фасадная подсветка по расписанию, уменьшение мощности ламп в ночные часы и т.д.)
- Поднять освещенность в бледно освещенных точках до минимально безопасных уровней (не менее 5-10 лк. для маршрутов движения пешеходов) [1].

4. Технические меры.

Рекомендуется внедрение следующих технических решений:

- Переход на светильники с направляющими экранами/оптикой, исключающей выброс света вверх;

- Замена устаревших ламп на энергоэффективные светильники с возможностью удаленной регулировки яркости;
- Использование систем, управляющих освещением (диммирование в ночное время, установка датчиков движения в промежуточных зонах) [2];
- Зонирование освещения: различные режимы и мощности для центров, магистралей, жилых кварталов и парков.

5. Градостроительные и организационные меры.

Необходима разработка и внедрение городского регламента по наружному освещению (стандарты направленности светового потока, максимально допустимых уровней для рекламных щитов и фасадов), а также регулярный мониторинг уровней освещенности во всех районах города, с устранением выявленных нарушений.

Сравнение Воронежа с другими крупными городами

Москва является одним из самых ярко освещенных городов России. Высокий уровень урбанизации, плотность застройки, насыщенность транспортной инфраструктуры, масштабное использование архитектурной подсветки и рекламных конструкций формируют значительное световое загрязнение. Ночной световой ореол Москвы четко заметен на спутниковых снимках и распространяется на десятки километров вокруг черты городской агломерации.

Исследования, проводимые городскими службами Москвы и независимыми организациями, показывают:

- На центральных улицах Москвы уровень освещенности зачастую превышает 20-25 лк, что значительно выше минимальных норм для комфортного и безопасного передвижения в ночное время суток.
- Вдоль крупных магистралей, ТТК и МКАД значения могут достигать 70-100 лк. за счет высокой плотности светильников и архитектурной подсветки зданий вдоль этих магистралей.
- В жилых дворах часто поддерживаются современные стандарты 6-15 лк., но в некоторых районах города новое LED-освещение приводит к избыточной освещенности.

- Яркое свечение рекламных экранов и витрин на центральных улицах создает локальные пики освещенности до 1000-3000 кд/м². Это является значимой проблемой светового загрязнения.

Таким образом, в Москве присутствуют черты, характерные для мегаполисов – переизбыток освещения, высокая плотность источников света и слабая направленность светового потока (доля света уходит вверх и в стороны).

Несмотря на высокий уровень светового загрязнения, Москва является одним из немногих российских городов, которые активно внедряют современные технологии для ограничения негативных последствий.

1. Внедрение светильников с контролируемой направленностью светового потока. Москва постепенно заменяет старые натриевые и ртутные светильники на современные LED-светильники (с экранированной оптикой, уменьшающей световой поток вверх; с защитными колпаками, исключающими «слепящий эффект»; с узконаправленным световым пучком, направленным исключительно на дорожное покрытие). Это значительно уменьшает рассеивание света вверх и по сторонам.

2. Использование умного (адаптивного) освещения. На ряде улиц и дорог уже внедрена система, позволяющая в автоматическом режиме регулировать яркость, снижать световой поток после полуночи, контролировать при помощи датчиков движения освещенность в жилых районах. Такие системы позволяют снижать яркость и энергопотребление до 30-40 % в периоды, когда активность минимальна.

- Ограничение яркости наружной рекламы. В Москве действует норматив, регулирующий максимальную яркость рекламных конструкций и время работы светящихся цифровых рекламных экранов, а также запрещающий направлять свет в сторону окон жилых домов.

3. Контроль архитектурной подсветки. Для уменьшения светового загрязнения предпринимаются следующие меры:

- Регулируется время работы подсветки зданий (большинство элементов подсветки отключается после 23:00-24:00),

- Разрабатываются новые схемы подсветки объектов исторического значения (подсветка направляется только на фасад, исключая «подсветку неба»).

Также постепенно вводится практика применения теплого света (2700-3000К), снижающего эффект светового загрязнения.

4. Программа по снижению энергопотребления. Сокращение мощности освещения напрямую влияет на уменьшение светового загрязнения. В Москве действует программа: сокращения количества светильников в местах, где освещенность избыточна; оптимизации расстояний между опорами осветительных приборов; замены устаревших систем уличного освещения.

Эти мероприятия уже показывают положительный эффект и могут быть использованы как пример при разработке решений для Воронежа и других городов.

В Воронеже прослеживается умеренно высокий уровень искусственной освещенности, который связан с плотной городской застройкой в отдельных районах, значительным количеством торговых центров и транспортных магистралей. Для Москвы характерен значительно более высокий уровень освещенности, который обусловлен масштабом мегаполиса и большим количеством архитектурной подсветки. Париж и Лондон, невзирая на большие размеры, показывают более сбалансированную световую среду благодаря наличию строгих норм по использованию наружного освещения и модернизации устаревших систем освещения. В этих мегаполисах используются источники света с ограниченным световым потоком вверх и теплой цветовой температурой, это снижает негативное влияние на ночное небо.

В Воронеже программ по борьбе с избыточной освещенностью, применяемых системно, нет (на официальном сайте городского округа город Воронеж информации о таких проектах не представлено). В Москве активно ведется модернизация наружного освещения, в том числе замена неэффективных ламп на LED-светильники с интеллектуальным управлением. Париж и Лондон имеют более развитую нормативно-правовую базу: действуют законы, ограничивающие работу ночной подсветки, а также программы, призванные снижать энергопотребление и сохранять качество ночной инфраструктуры. Эти города вы-

ступают примерами того, как использование грамотного регулирования на государственном и муниципальном уровне позволяет значительно уменьшить уровень светового загрязнения.

В Воронеже архитектурная подсветка применяется точечно, при этом в отдельных районах наблюдается избыточность декоративного освещения торговых объектов и новостроек. В Москве архитектурная подсветка широко применяется, что значительно увеличивает общее свечение неба. В Париже и Лондоне архитектурная подсветка строго регламентируется: она включается на ограниченное время и подлежит специальному регламентированию по направленности и спектру. Такой подход снижает визуальный шум и уменьшает воздействие на экосистемы и здоровье человека.

В Воронеже уровень осведомленности населения по поводу светового загрязнения остается на низком уровне, это связано с тем, что тема редко поднимается в местных средствах массовой информации и местными властями; требования к освещению редко рассматриваются как экологическая проблема. В Москве эта проблема привлекает большее внимание благодаря инициативам по модернизации освещения и участию различных экологических организаций. В Париже и Лондоне население массово информируется по проблеме светового загрязнения, это является частью экологической политики.

На фоне мировых городов, где развиты экологические стандарты, Воронеж уступает в отношении энергоэффективных и экологичных систем освещения. В Париже и Лондоне действуют строгие требования с направленности светового потока, применению теплого спектра и ограничению архитектурной подсветки. Кроме того, в данных городах применяются технологии автоматического регулирования, позволяющие снижать интенсивность освещения в ночное время и тем самым снижать негативное последствие на городской и пригородный ландшафт.

Воронеж находится на начальной стадии внедрения подобных технологий. Несмотря на постепенную замену устаревшего оборудования на современное, такие решения не имеют системного характера, и часть светильников остаются оснащенными старыми лампами, которые создают переизбыток рас-

сеянного света. Отсутствие общегородской программы по борьбе со световым загрязнением сдерживает снижение уровня световой нагрузки.

Тем не менее, в сравнении с крупными мегаполисами мира Воронеж имеет потенциал для формирования более устойчивой системы освещения. Благодаря компактной городской структуре и меньшей плотности застройки, внедряемые современные нормы могут дать быстрый и качественный эффект.

Пути снижения светового загрязнения в Воронеже

Наиболее эффективным методом является применение светильников с четкой системой экранирования. Данные устройства направляют поток света исключительно вниз, исключая подсветку неба и блики на фасадах зданий. Внедрение светильников с полным горизонтальным отсечением позволяет предотвратить утечку света вверх и значительно снижает яркость и размеры светового купола города.

Также важным является выбор светового спектра источников освещения. Наиболее экологичными считаются источники теплого белого света с цветовой температурой 2700-3000К. такой спектр уменьшает воздействие на биоритмы у человека и животных, при этом так же снижая контрастность ночной среды. В Воронеже наблюдается тенденция на переход к светодиодным светильникам, но большинство из них имеют чрезмерно холодный спектр (4000-6500К), что увеличивает объем рассеиваемого света. Замена данных светильников на теплые аналоги улучшает качество городской световой среды.

Дополнительным архитектурно-техническим решением является внедрение систем диммирования (автоматического уменьшения яркости в поздние ночные часы). Это актуально для районов, где активность людей и транспорта в поздние ночные часы значительно снижается после полуночи. Такие решения позволяют снизить яркость до 30-50%, тем самым снижая уровень освещенности без ущерба безопасности движения и экономя электроэнергию.

Рекомендуется так же применять интеллектуальные системы управления уровнем освещенности, которые регулируют интенсивность светового потока в зависимости от погодных условий, активности людей или транспорта (такие системы показали

свою эффективность в Лондоне). Использование датчиков движения, таймеров и контроллеров дает возможность адаптировать освещение под потребности города [3].

Городское планирование и нормативные меры

Ключевым инструментом эффективной борьбы со световым загрязнением в Воронеже является введение норм, ограничивающих максимальную яркость наружного освещения и световую направленность светильников. Во множестве мировых городов действуют такие программы. Например, в Лондоне применяется система классификации районов по уровню освещенности (E0-E4), где для каждой зоны строго установлен максимально допустимый световой поток и яркость архитектурной подсветки. В Париже существуют требования использования светильников с нулевым световым потоком вверх (0% ULOR), а также ограничивается время работы архитектурной подсветки зданий (большинство объектов отключаются после 01:00 ночи. Для Воронежа полезно адаптировать данные наработки, определив собственный стандарт городского освещения с учетом местных условий [4].

Также требуется регулирование яркости рекламных конструкций. Избыточная яркость световых конструкций – одна из главных причин светового загрязнения. В Лондоне применяется лимит на яркость рекламных щитов, особенно вблизи жилых зон. В Париже запрещены чрезмерно яркие вывески в исторических кварталах и рядом с зелеными зонами [5]. Такие правила могли бы значительно улучшить ночную атмосферу Воронежа.

Снижение светового загрязнения невозможно только лишь за счет нормативных и технических мер – немалую роль играет экологическое просвещение и участие населения. От уровня осведомленности жителей зависит эффективность городской политики в части сокращения светового загрязнения [6].

Горожане могут принимать широкое участие в мониторинге светового загрязнения. Современные смартфоны позволяют измерять уровень освещенности ночью и отправлять данные в единую городскую базу данных, что помогает выстраивать карту светового загрязнения.

Таким образом, экологическое образование и участие жителей являются важнейшими мерами комплексной стратегии борьбы со световым загрязнением.

Только при совместных усилиях власти, бизнеса и населения возможно создание экологичной световой среды в Воронеже.

Заключение

Проведенное исследование позволяет комплексно оценить уровень светового загрязнения в городе Воронеже и сравнить его с практиками, применяемыми в крупных российских и европейских городах. Анализ полученных данных показывает, что в Воронеже сохраняется значительное превышение уровня ночной освещенности в центральных и коммерческих зонах. Результаты замеров, демонстрируют неравномерность освещенности и наличие зон с ярко выраженным избытком светового потока. Это подчеркивает необходимость оптимизации городской системы освещения.

Исследование выявило пути улучшения сложившейся ситуации. Среди наиболее возможных путей решения проблемы можно выделить следующие: применение архитектурно-технических решений, модернизация систем уличного освещения, введение нормативов для рекламных конструкций, введение нормативов для архитектурной подсветки, активное привлечение населения к вопросу ответственного использования света. В целом город имеет большой потенциал к улучшению ситуации в части светового регулирования.

Список литературы

1. Курочкина В.А., Калиниченко Е.К., Белова М.О. Малые архитектурные формы в структуре открытых общественных пространств города // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13, № 5. DOI 10.15862/28NZVN521
2. Петрухин В.А., Черноусов П.С., Дмитриенко С.С., и др. Сравнительный анализ пульсации светового потока современных источников света // Вестник науки и образования. 2019. № 12 (66). Часть 1. С. 18 – 23.
3. Макгрегор К.Д., Эванс Д.М., Рочева В. Неблагоприятное экологическое воздействие светового загрязнения: роль светодиодов в минимизации последствий // Полупроводниковая светотехника. 2020. № 3(65). С. 46-51.

4. Менкенов А.В. Правовая охрана ночного неба от светового загрязнения // Теоретическая и прикладная юриспруденция. 2025. № 2(24). С. 115-125.
5. International Dark-Sky Association. Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting, Tucson, Arizona; 2010.
6. Adkins J.K., Birriel J.J., Gonzalez-Espada W.J., et al. Physics-Based Light Pollution Education Outreach Program: Promise and Problems // The Physics Teacher. 2025. V. 63(6). P. 428-431. DOI: 10.1119/5.0165845

References

1. Kurochkina V.A., Kalinchenko E.K., Belova M.O. Small architectural forms in the architecture of open spaces of the city // Bulletin of Eurasian Science. 2021. V. 13, No. 5. DOI 10.15862/28NZVN521 (in Russian)
2. Petrukhin V.A., Chernousov P.S., Dmitrienko S.S., and others. Comparative analysis of the pulsation of the luminous flux of modern light sources // Bulletin of Science and Education. 2019. No. 12 (66). Part 1. P. 18-23. (in Russian)
3. McGregor K.D., Evans D.M., Rocheva V. Adverse environmental effects of light pollution: the role of LEDs in minimizing the consequences // Semiconductor lighting engineering. 2020. No. 3(65). P. 46-51.
4. Menkenov A.V. Legal protection of the night sky from light pollution // Theoretical and applied jurisprudence. 2025. No. 2(24). P. 115-125. (in Russian)
5. International Association of Dark Sky Lovers. Problems of visibility, environment, and astronomy related to outdoor lighting with a saturated blue-white hue, Tucson, Arizona; 2010.
6. Adkins, J.K., Birriel, J.J., Gonzalez-Espada, W.J., and others. Information and educational program on light pollution based on physics: prospects and problems // Physics Teacher. 2025. V. 63(6). P. 428-431. DOI: 10.1119/5.0165845

Тепоян Оганес Мкртичевич – студент группы бПГС-255 строительного факультета, ВГТУ
Колюкаева София Геннадьевна – студент группы бВМ-251 факультета информационных технологий и компьютерной безопасности, ВГТУ
Корнеева Валерия Владиславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

ПЕРСОНАЛИИ

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА РАН ВАЛЕНТИНА МИХАЙЛОВИЧА ИЕВЛЕВА



19 апреля 2026 г. на 88 году ушёл из жизни Валентин Михайлович Иевлев, академик РАН, Заслуженный деятель науки РСФСР, член редакционной коллегии нашего журнала «Химия, физика и механика материалов». Валентин Михайлович Иевлев родился 1 декабря 1938 года в с. Пригородки Усманского района Воронежской (а ныне Липецкой) области. В 1961 году В.М. Иевлев окончил Физический факультет Воронежского государственного университета. В 1961–1963 гг. он работал инженером изотопной лаборатории Узэнергогаз, КБ электромашиностроения и приборостроения в г. Ташкенте, в 1963–1966 гг. – старшим инженером в ОКБ п/я 264 радиосвязи Воронежа. Далее его карьера связана с Воронежским политехническим институтом (ныне – Воронежский государственный технический университет, ВГТУ): аспирант кафедры физики металлов, старший преподаватель, доцент, профессор, в 1977–1983 гг. декан физико-технического факультета, в 1979–2004 гг. – заведующий кафедрой физики, в 1983–2003 гг. – проректор по научной работе. С 2004 года – главный научный сотрудник региональной научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и электронографии ВГТУ, профессор кафедры физики твердого тела ВГТУ, с 2008 года – основатель и заведующий кафедрой материаловедения и индустрии наносистем ВГУ. С 2004 года – главный научный сотрудник Института физико-химических проблем керамических материа-

лов РАН (с 2007 года – Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова). С 2013 года – заведующий кафедрой междисциплинарного материаловедения Факультета наук о материалах Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Под руководством В.М. Иевлева была создана одна из самых крупных в стране Региональная научно-исследовательская лаборатория электронной микроскопии и электронографии при ВГТУ. Впервые в стране разработаны представления о механизме релаксации упругой деформации при эпитаксии, положенные в обоснование выбора ориентации кристалла подложки. Разработана методика оценки типа дислокационных петель, формирующихся при ионной имплантации. Лаборатория проводила входную экспертизу качества пластин кремния, поступавших в НПО «Электроника». Впервые создана и укомплектована всем необходимым сверхвысоковакуумная система, позволяющая осуществлять процессы синтеза силицидов металлов для оценки температурного порога силицидообразования на ювенильных (предельно чистых) поверхностях. В рамках признанной научной школы В.М. Иевлева подготовлены 5 докторов наук и 34 кандидата наук. Он – автор более 660 научных публикаций, в том числе 5 монографий, 8 учебных пособий и 10 авторских свидетельств и патентов.

Валентин Михайлович до последних дней оставался в науке на передовой: руководил аспирантами и диссертационным советом, а также щедро делился новыми идеями и не забывал про своё «учёное перо», продолжая публиковаться в ведущих научных журналах. Это был человек удивительной внутренней гармонии, целеустремлённости и порядочности. Светлая память о Валентине Михайловиче навсегда сохранится в сердцах его коллег и учеников.

Рудаков Олег Борисович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Белоногов Евгений Константинович – д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры физики, ВГТУ

Куцев Сергей Борисович – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физики, ВГТУ

Тураева Татьяна Леонидовна – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой физики, ВГТУ

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 2(49), 2026

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 30.06.2026.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 12,8. Уч.-изд. л. 8,5.
Тираж 25 экз. Заказ № 103
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