



ISSN: 2686-7567

2022  
№3(29)

# ВЕСТНИК ГГТУ

Технические науки



ISSN: 2686-7567

**ВЕСТНИК ГГНТУ**  
**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**HERALD OF GSTOU**  
**ENGINEERING SCIENCES**

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

**2022**

Том XVIII

**№ 3 (29)**

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д. т. н., профессор Минцаев Магомед Шавалович

Зам. главного редактора – д. т. н., профессор  
С-А. Ю. Муртазаев

Ответственный секретарь – к. т. н., доцент  
М. Ш. Саламанова

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель – профессор, д. ф-м. н.  
И. А. Керимов (АН ЧР)

д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН  
Б. А. Григорьев (ВНИИГаз)

д. т. н., профессор Д. С. Реченко (АГНИ)

к. т. н., доцент М. Я. Пашаев (ГГНТУ)

к. т. н., М. С. Сайдумов (ГГНТУ)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Строительство. Архитектура

д. т. н., профессор Д. К-С. Батаев

д. т. н., профессор Г. Н. Гаджишалапов

д. т. н., доцент И. Г. Гайрабеков

д. т. н., профессор Х. Н. Мажиев

канд. архитектуры, доцент Ш. А. Насуханов

д. т. н., профессор Т. А. Хежев

### Химическая технология

д. т. н., доцент С. П. Иванов

д. т. н., профессор Л. Ш. Махмудова

д. х. н. Х. М. Кадиев

д. т. н., профессор Х. Х. Ахмадова

д. т. н., профессор О. Н. Каратун

д. х. н., профессор Э. А. Александрова

к. т. н., доцент А. А. Эльмурзаев

### Информатика, вычислительная техника и управление

д. п. н., профессор Э. Д. Алисултанова

д. т. н., доцент И. Н. Ажмухамедов

д. т. н., профессор А. В. Илюхин

к. т. н. М. Р. Исаева

д. т. н., профессор В. И. Марсов

д. т. н., профессор К. Е. Румянцев

д. т. н., профессор А. Л. Рутковский

д. т. н., профессор Е. А. Хадзарагова

к. т. н., доцент И. В. Хасамбиев

д. т. н. М. А. Хажмурадов

к. т. н. З. Л. Хакимов

## EDITOR – IN-CHIEF

Magomed Mintsaeв, Doctor in Engineering

Associate Editor – Said-Alvi Murtazaev, *Doctor  
in Engineering*

Executive Secretary – Madina Salamanova, *PhD  
in Engineering*

## EDITORIAL COUNCIL

Chairman – Ibragim Kerimov, *Doctor in Physics  
and Mathematics*

Boris Grigoryev, *corresponding member of RAS,  
Doctor in Engineering*

Rechenko Denis, *Doctor in Engineering*

Magomed Pashaev, *Phd in Engineering*

Magomed Saidumov, *Phd in Engineering*

## EDITORIAL BOARD

### Construction. Architecture

Dena Bataev, *Doctor in Engineering*

Khadzhishalapov Gadzhimagomed, *Doctor in Engineering*

Ibragim Gayrabekov, *Doctor in Engineering*

Khasan Mazhiev, *Doctor in Engineering*

Shadid Nasukhanov, *PhD in Architecture*

Tolya Khezhev, *Doctor in Engineering*

### Chemical Technology

Serguey Ivanov, *Doctor in Engineering*

Lyubov Makmudova, *Doctor in Engineering*

Khusain Kadiev, *Doctor in Chemistry*

Khava Akhmadova, *Doctor in Engineering*

Olga Karatun, *Doctor in Engineering*

Elvira Alexandrova, *Doctor in Chemistry*

Ayub Elmurzaev, *PhD in Engineering*

### Computer Science, Computer Engineering and Management

Esmira Alisultanova, *Doctor in Pedagogics*

Iskandar Azhmukhamedov, *Doctor in Engineering*

Madina Isaeva, *PhD in Engineering*

Andrey Ilyukhin, *Doctor in Engineering*

Vadim Marsov, *Doctor in Engineering*

Konstantin Rumyantsev, *Doctor in Engineering*

Alexander Rutkovsky, *Doctor in Engineering*

Elena Khadzaragova, *Doctor in Engineering*

Manap Khazhmuradov, *Doctor in Engineering*

Ibragim Khasambiev, *PhD in Engineering*

Zaur Khakimov, *PhD in Engineering*

---

---

Учредитель: ФГБОУ ВО

«Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации (с 15.02.2022г.), в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека).

Подписной индекс АО «Почта России» ПА 753

Адрес редакции/издателя:

364024, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Тел./факс: (8712) 29-59-32

<http://gstou.ru/science/ggntu-works.php>

e-mail: [trudy-ggntu@mail.ru](mailto:trudy-ggntu@mail.ru)

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

© ФГБОУ ВО Грозненский государственный нефтяной технический университет  
им. академика М.Д. Миллионщикова, 2022

© Редакционная коллегия

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<b>Аларханова З. З., Батаева П. Д., Ибрагимов И. Б.</b> Влияние ПАВ – «L. O. C.» на свойства бетонных композитов .....	5
<b>Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Зайпуллаев М. М-Я., Кокшев П. А.</b> Топологические модели структуры диффузионного слоя многокомпонентных вяжущих .....	14
<b>Санакулов А. Б., Лебедев Е. В., Небрятенко Д. Ю.</b> Битумно-полимерные стыковочные ленты для усиления верхних слоев автомобильных дорог .....	23
<b>Стельмах С. А.</b> Типы структурной неоднородности бетонов и ее учет в технологии и расчете строительных конструкций .....	32
<b>Щербань Е. М.</b> Современное состояние вопроса геополимерных бетонов в России и за рубежом .....	42

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Кокшев П. А., Галанина Н. А., Суворов Д. Н., Марсов В. И.</b> Особенности перехвата пакетов и их первоначального анализа в сетевом анализаторе данных цифровой подстанции .....	55
<b>Приходько Д. И., Мокряков А. В., Горшков В. В.</b> Классификация видов технической эксплуатации информационной системы и расширенный этап эксплуатации в современных моделях жизненного цикла.....	64

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Василовская Н. Г., Енджиевская И. Г., Кочеткова Н. М.</b> Экологически безопасный композиционный материал для высокотемпературной теплоизоляции .....	73
<b>Межидов В. Х., Дадашев Р. Х., Гацаев З. Ш., Галанина Н. А.</b> Физико-химические процессы при синерезисе гидрогеля бентонита .....	82
<b>Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С., Исаева М. Р.</b> Усовершенствованное диффузионное покрытие насосно-компрессорных труб.....	90
<b>Сидоров А. В., Ясьян Ю. П.</b> Исследование фракционного состава нефтяного сырья ООО «АФИПСКИЙ НПЗ» на аппарате полной разгонки нефти .....	99

## CONTENTS

### CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

- Z. Z. Alarkhanova, P. D. Bataeva, I. B. Ibragimov**  
Influence of surfactants – «L. O. C.» on the properties of the composite  
concrete based material ..... 5
- S-A. Yu. Murtazaev, M. Sh. Salamanova, M. M-Ya. Zaipulaev, P. A. Kokshev**  
Topological models of the structure of the diffusion layer of multiponent binders ..... 14
- A. B. Sanakulov, E. V. Lebedev, D. Yu. Nebratenko**  
Bitumen-polymer joint tapes for reinforcing the upper layers of roads ..... 23
- S. A. Stelmakh**  
Types of structural heterogeneity of concrete and its accounting  
in the technology and calculation of building structures ..... 32
- E. M. Shcherban**  
The current state of the issue of geopolymer concrete in Russia and abroad..... 42

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

- P. A. Kokshev, N. A. Galanina, D. N. Suvorov, V. I. Marsov**  
Features of packet capture and their initial analysis in the network data analyzer  
of the digital substation ..... 55
- D. I. Prikhodko, A. V. Mokryakov, V. V. Gorshkov**  
Classification of technical operation of information system and extended stage  
of extraction in modern life cycle models ..... 64

### CHEMICAL TECHNOLOGIES

- N. G. Vasilovskaya, I. G. Yendzhievskaya, N. M. Kochetkova**  
Environmentally safe composite material for high-temperature thermal insulation ..... 73
- V. Kh. Mezhidov, R. Kh. Dadashev, Z. Sh. Gatsaev, N. A. Galanina**  
Physico-chemical processes during the syneresis of bentonite hydrogel ..... 82
- A. S. Nuradinov, N. S. Uzdieva, S. S-S. Akhtaev, M. R. Isaeva**  
Advanced diffusion coating pumping and compressor pipes ..... 90
- A. V. Sidorov, Yu. P. Yasyan**  
Investigation of the fractional composition of oil raw materials  
of AFIPSKY REFINERY LLC on the apparatus of complete oil distribution ..... 99

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 548.736.6.

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.69.72.001

### ВЛИЯНИЕ ПАВ – «L. O. C.» НА СВОЙСТВА БЕТОННЫХ КОМПОЗИТОВ

© З.З. Аларханова, П.Д. Батаева, И.Б. Ибрагимов

*КНИИ РАН им. Х.И. Ибрагимова, Грозный, Россия*

В работе рассмотрено влияние поверхностно-активного вещества «L. O. C.» на эксплуатационные характеристики композиционного материала на основе бетона с целью установления его эффективности как модификатора. Изготовлены бетонные образцы, модифицированные разрабатываемым многофункциональным чистящим средством – «L. O. C.», проведены испытания образцов бетона на прочность на сжатие, при этом менялись возраст образца и дозировки многофункционального чистящего средства в нем (% от массы цемента). Результаты проведенных испытаний показали, что модифицированные многофункциональным чистящим средством – «L. O. C.» образцы композиционного материала имеют лучшие характеристики. Установлена оптимальная дозировка разрабатываемой химической добавки. Основным преимуществом таких химических добавок является их полифункциональность действия, экологичность и малые дозировки, которые должны обеспечить экономическую целесообразность.

**Ключевые слова:** модификация, композиционный материал, многофункциональное чистящее средство – «L. O. C.», анионоактивные и неионогенные ПАВ.

Основным направлением развития производства строительных материалов является модификация композиционных материалов, позволяющая получать материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Химические добавки позволяют не только значительно сократить расход цемента, но и совершенствуют структурные и физико-механические свойства бетонных композитов.

Из химических добавок, регулирующих свойства готовых бетонов и растворов, более востребованы пластифицирующие добавки, как наиболее эффективные, доступные, недорогие и т.д. В качестве пластифицирующих добавок при изготовлении цементных бетонов и растворов в целях экономии расхода цемента и для улучшения свойств бетонов и растворов широко используют поверхностно-активные вещества. Важная роль ПАВ в строительстве,

как наиболее распространенных модификаторов, обусловлена тем, что на их основе можно получать практически любые типы модифицирующих добавок. Указанные химические добавки позволяют улучшить такие свойства, как: пластичность, текучесть, прочность, удобоукладываемость и т.д. [1-6].

Эффективность влияния поверхностно-активных веществ для бетонных и растворных смесей проявляется с момента смешивания ПАВ с водой затворения и с его остальными компонентами, облегчая смачивание и смешивание составляющих бетона. Также целым рядом исследователей [1-4; 6-8] установлено, что химические добавки – ПАВ являются дефлокулянтами цемента, то есть предотвращают флокуляцию цементных частиц и разрушают ранее образовавшиеся, обеспечивая тем самым пластичность бетонов и растворов. Введение

химических добавок ПАВ в какой-то степени позволяет решить важную проблему в технологии приготовления бетонов и растворов – уменьшение водоцементного отношения.

Как известно, использование рецептурного количества воды, в два-три раза большего, чем необходимо для протекания реакций гидратации, требуется для обеспечения подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси, отрицательно влияя на качество бетона. Ведь в процессе твердения портландцемент только до 25% от своей массы воды может химически связать, в отличие от глиноземистого, который связывает более сорока процентов воды. В процессе твердения бетона несвязанная вода начинает испаряться, существенно ухудшая поровую структуру, следовательно, и прочность бетона [9-13].

Химические добавки – ПАВ – это группа органических соединений, которые добавляются в бетонные (растворные) смеси, чаще для повышения их пластичности. Также ПАВ способствуют значительному уменьшению В/Ц отношения, сокращая тем самым расход цемента, повышают водонепроницаемость, морозостойкость, долговечность, не снижая прочность бетонных материалов и изделий. Такие химические добавки повышают поверхностное натяжение на границах раздела фаз, образуя на этих поверхностях адсорбционные слои. По основному эффекту действия на бетонные (растворные) смеси ПАВ, используемые в бетонах и растворах, делят на следующие группы: гидрофилизующие, гидрофобизующие, воздухововлекающие.

Гидрофилизующие добавки сдерживают коагуляцию новообразований, предотвращая слипание частиц цемента между собой. Наибольшее применение в производстве бетонных (растворных) смесей получили гидрофилизующие добавки на основе лигносульфатов. Гидрофобизующие добавки повышают пластичность, связанность бетонной (растворной) смеси, находящейся в покое. В качестве гидрофобизующих добавок применяются в основном новые добавки – битумные дисперсии, синтетические жирные кислоты и другие.

Воздухововлекающие добавки способствуют образованию бетонных смесей с до-

полнительным количеством воздуха, повышая тем самым удобоукладываемость смеси, не увеличивая, как обычно, объем вяжущего. В производстве бетона в основном используют воздухововлекающие добавки на основе смолы (СНВ) [14, 15].

Целью настоящей работы является подбор химических добавок и разработка составов бетонов и растворов, которые позволят не только повысить качество строительных композитов, но и понизить высокую стоимость строительных композитов и изделий из них, за счет снижения расхода цемента.

Для достижения поставленной цели в качестве химического модификатора предложено многофункциональное чистящее вещество – «L. O. C.», которое является поверхностно-активным веществом, может быть комплексным пластификатором, оказывая пластифицирующе-водоредуцирующий эффект.

Таким образом, предполагается, что, используя в качестве модификатора чистящее вещество – «L. O. C.», может быть получен композиционный материал на основе бетона. При этом многофункциональное чистящее средство – «L. O. C.» содержит анионноактивные и неионогенные ПАВ, которые улучшают такие свойства, как пластичность, текучесть, прочность [2]. Содержащиеся в разрабатываемых добавках – «L. O. C.» высокоактивные ингредиенты, полученные из натуральных источников, являются безопасными для человека и природы, не содержат щелочей и кислот и обладают антибактериальным эффектом.

По химическому составу добавка – «L. O. C.» содержит:

- анионноактивные ПАВ до 15%, химический состав  $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3\text{Na C}_{12+2n}\text{H}_{25+4n}\text{NaO}_{4+n}\text{S})$ ;
- неионогенные ПАВ до 5% ( $\text{C}_{10-16}$  спирт этоксилят), гидрофильные поверхностно-активные добавки на основе синтетических первичных спиртов.

Анионноактивные поверхностно-активные добавки содержат в молекуле одну или несколько полярных групп ( $\text{COOHM}$ ,  $\text{OSO}_2\text{OHM}$ ,  $\text{SO}_3\text{HM}$ ), которые и определяют их активность. Как наиболее гидрофилизующие вещества анионноактивные добавки влияют в большей

степени на реологические свойства бетонной и растворной смеси. При адсорбировании анионоактивных добавок на поверхности твердых частиц происходит процесс хемосорбции и высвобождается большое количество воды, которая приводит к улучшению пластичности, снижению пористости, следовательно, и повышению прочности. Снижение водосодержания, как правило, способствует лучшему формированию структуры бетона, что подтверждается повышением прочности бетона.

Неионогенная часть чистящих средств – «L. O. C.» представляет собой поверхностно-активные добавки, полученные на основе синтетических первичных спиртов. Растворимость ПАВ, полученных на основе синтетических первичных спиртов, обусловлена наличием в гидрофильной части гидроксильных и эфирных групп, которые образуют с молекулами воды химическую связь с образованием гидратов [6].

Образцы композиционного материала, модифицированные разрабатываемым многофункциональным чистящим средством – «L. O. C.», были получены следующим образом. Прежде всего, была определена плотность многофункционального чистящего средства – «L. O. C.» фирмы AMWAY HOME. Плотность измеряли ареометром, при температуре 26°C, и была равна ( $\rho = 1,023$  г/мл), далее измерили поверхностное натяжение добавки – «L. O. C.». Измерение поверхностного натяжения проводили в лаборатории экспериментальной физики, на приборе «Тензиометр DSA – 100», фирмы CRUS, методом висящей капли. Поверхностное натяжение измеряли также при температуре 26°C, и равно  $\gamma = 27,5$  мН/м.

Объем ПАВ – «L. O. C.», необходимый для получения композита, рассчитали, учитывая приблизительную оптимальную для композита дозировку (1% – 2% от массы цемента). Для первых трех образцов рассчитали минимальную дозировку ПАВ 0,3%, 0,5%, 1%, что составляет от массы цемента (3 г, 5 г, 10 г). Далее, через плотность химической добавки ( $\rho = 1,023$  г/мл) рассчитали объем ПАВ – «L. O. C.» (3,1 мл, 5,1 мл и 10,2 мл) и были изготовлены образцы композиционного материала с соответствующим количеством добавок.

Известны разнообразные способы введения химических добавок в бетонные смеси: с водой затворения, отдельно после затворения смеси водой, многостадийное затворение смеси и т.д. Пользовались первым приемом, свойственным для ввода пластифицирующих добавок, каковым является добавка «L. O. C.». Учитывая, что каждый способ ведения химических добавок влияет на свойства бетонной смеси по-разному, можно установить наиболее эффективный способ введения добавки в состав бетонной смеси и влияние на свойства бетона [8]. Технология изготовления бетона с химической добавкой, путем введения добавок с водой затворения, отличается от обычной тем, что вместо воды затворения готовится водный раствор добавки соответствующей концентрации.

При подготовке бетонной смеси с прибавлением жидкого модификатора желательнее придерживаться следующей последовательности:

1) Важно соблюдать пропорции компонентов в смеси для сохранения свойств бетонной смеси.

2) Необходимо обеспечить однородную консистенцию модифицирующих добавок, тщательно перемешав с водой (1 ч) электромешалкой.

3) Модификатор необходимо добавить в теплую воду (до 80°C), учитывая допустимую температуру модификатора для сохранения его свойств, и перемешивать полученный раствор до однородности.

4) Выдержать подготовленный состав на протяжении одного часа до введения.

5) Далее, полученный раствор химической добавки залить во вращающуюся емкость бетономешалки.

6) Добавить портландцемент, заполнитель и перемешивать (примерно 1 час), добавляя при необходимости воду, до однородного состояния.

Раствор рабочей концентрации предварительно разводится в емкости для приготовления композита и добавляют заблаговременно подготовленный: щебень – 2,7 кг, песок – 1,25 кг, цемент М300 – 0,95 кг, перемешивают не менее одного часа. В пересчете на

Таблица 1.

Состав бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> бетона без добавок

Марка бетона по прочности	Содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup>			
	Вода	Цемент М400	Песок	Щебень
М300	220	380	700	1080

Таблица 2.

Состав бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> бетона, химической добавкой ПАВ – Л. О. С

№ образца	Класс бетона	Содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup>				Количество добавки от массы цемента	
		Вода л	Цемент М400 кг	Песок кг	Щебень кг	%	мл
1	В20	220	380	700	1080	0,3	3,1
2						0,5	5,1
3						1	10,2

1 м<sup>3</sup> бетонной смеси получается соотношение 1080/700/380/220 соответственно. Готовят три вида образцов с соответствующим количеством добавок: № 1-0,3%; № 2-0,5%; № 3-1%.

Приготовленную бетонную смесь разливают по квадратным формочкам, размером – 150 x150 x150 мм. Из каждого состава (образец № 1-0,3%, № 2-05% и № 3-1%) изготавливалось три серии образцов по 6 штук в каждой, для исследования их физико-механических свойств (удобоукладываемость и прочность). Образцы твердели в нормальных условиях: температура +24°С и относительная влажность воздуха в помещении 97%, сушили образцы и набирали прочность для дальнейших испытаний в течение 7, 14 и 28 суток.

Составы бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> бетона, без добавки поверхностно-активного вещества

и с добавкой «Л. О. С.», представлены в таблицах 1 и 2.

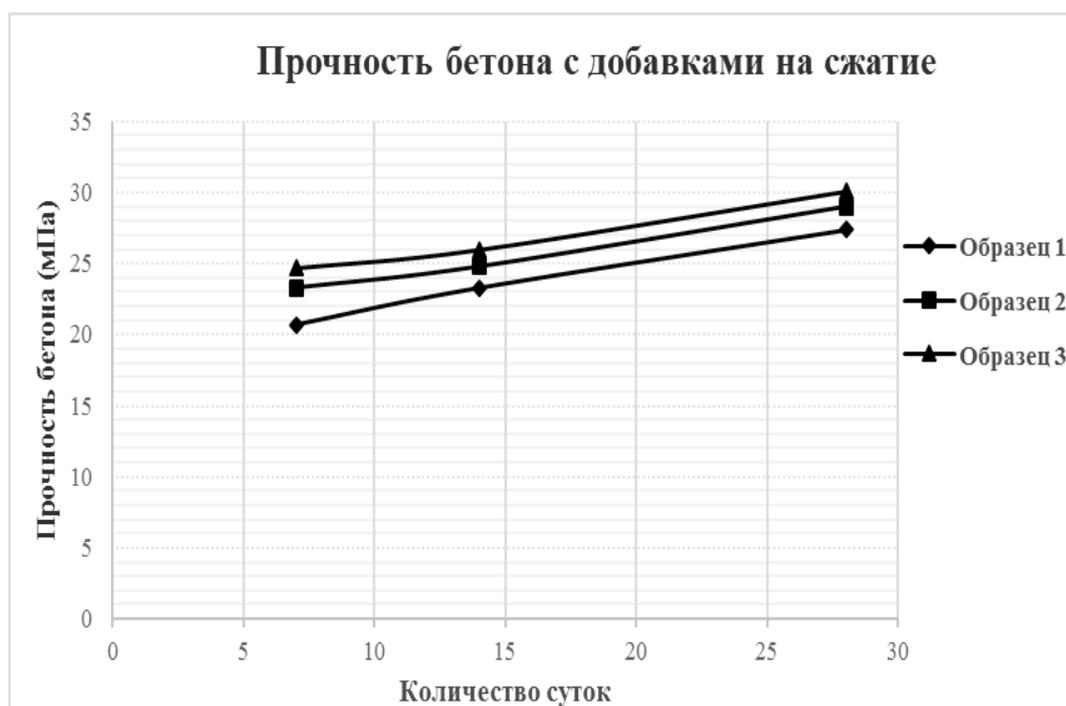
Получены образцы композиционного материала, модифицированные с разрабатываемой добавкой ПАВ – Л. О. С., и проводится экспериментальное исследование физико-механических свойств изготовленных образцов бетона. Исследование эффективности разрабатываемых модифицирующих добавок, как и принято, начинаем с определения ожидаемого основного положительного эффекта (удобоукладываемость и прочность) и экспериментального установления оптимальной дозировки разрабатываемого чистящего средства – «Л. О. С.».

Полученные результаты экспериментальных испытаний бетона на удобоукладываемость положительные, так как осадка конуса

Таблица 3

## Прочность бетона с добавками на сжатие

№ образца	Класс бетона	Количество добавки от массы цемента (%)		Прочность бетона (МПа)		
		%	мл	Возраст образца (сутки)		
				7	14	28
1	В 20	0,3	3,1	20,7	23,3	27,4
2		0,5	5,1	23,3	24,8	29
3		1	10,2	24,7	26	30,1



**Рис. 1.** Зависимость прочности бетона на сжатие от количества химических добавок – «L. O. C.» (образец № 1-0,3%; № 2-0,5%; № 3-1%)

равномерная. Все три образца находятся в пределах 11-13 см осадки и соответствуют марке бетона по удобоукладываемости – ПЗ, как мы видим на рисунке 1 [5, 9-11].

Для установления эффективности разрабатываемых добавок для бетонной и растворной смесей были получены три образца бетона, с указанным количеством (%) химической добавки в каждом образце, состав которых показан в таблице 3. Каждый образец испытывали по три раза, согласно установленному возрасту образца, через 7, 14 и 28 суток. Результаты испытаний полученных образцов бетона с добавками на прочность представлены в таблице 3.

Зависимость набора прочности бетона на сжатие, согласно выдержанному возрасту образца (7, 14 и 28 суток) от количества (% от массы цемента) химической добавки – «L. O. C.» в подготовленных образцах (№ 1-0,3%; № 2-0,5%; № 3-1%), графически можно представить следующим образом, рисунок 1.

Далее были изготовлены новые образцы бетона с различной дозировкой разрабатываемой химической добавки, для установления эффективности действия как модификатора и

определения оптимальной дозировки добавки – «L. O. C.».

Несмотря на то, что имеются разные способы установления эффективности действия ПАВ на бетонные и растворные смеси, даже с учетом индивидуальных особенностей цемента [7, 16, 17], оптимальную дозировку для нашей химической добавки определяли путем многократных экспериментальных подборов. Учитывая тот факт, что для добавки «L. O. C.» недостаточно теоретических и экспериментальных данных для прогнозирования, более того, установки ее оптимальной дозировки как пластификатора. Получены новые образцы композиционного материала, модифицированные с поверхностно-активными добавками «L. O. C.», количеством 1%, 1,5%, 2% (от массы цемента) и продолжается исследование их механических свойств. Составы полученных образцов бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> бетона (с добавкой ПАВ – «L. O. C.») представлены в таблице 4.

Исследование эффективности разрабатываемой химической добавки и установление оптимальной дозировки химической добавки – «L. O. C.» продолжили с определения ожидае-

Таблица 4

Состав бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> бетона (с добавкой ПАВ – «Л. О. С.»)

№ образца	Класс бетона	Содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup>				Количество добавки от массы цемента	
		Вода л	Цемент М400 кг	Песок кг	Щебень кг	%	мл
1	В 20	220	380	700	1080	1	10,2
2						1,5	15,3
3						2	20,4

мого основного положительного эффекта – повышение прочности.

Для установления эффективности введенных добавок в состав бетонной смеси были вновь получены три образца бетона, с указанным количеством (%) химической добавки в каждом образце, состав которых представлен в таблице 5. Каждый образец бетона испытали по три раза, согласно установленному возрасту образца, через 7, 14 и 28 суток. Результаты испытаний полученных контрольных образцов бетона с добавками (Б<sub>д</sub>) и стандартных образцов бетона без добавок (Б<sub>ст</sub>) на прочность (сжатие) представлены в таблице 5.

Результаты многократных экспериментальных испытаний образцов на прочность (сжатие) с добавками (1%, 1,5%, 2%) показывают, что наиболее оптимальной дозировкой для полученных образцов бетона является 1% добавки – «Л. О. С.». С увеличением дозировки от 1% до 2%, как мы видим по таблице 5, прочность бетона падает. При сравнительном анализе контрольных образцов бетона с 1% добавкой «Л. О. С.». со стандартным образ-

цом прочность контрольных образцов бетона повышается на 28%.

Многофункциональное чистящее средство – «Л. О. С.» ведет себя как комплексный пластификатор, оказывая пластифицирующе-водоредуцирующий эффект, повышая как пластичность, так и прочность бетона. Но это еще не все, основной компонент наших добавок лауретсульфат натрия как хороший пенообразователь может проявлять поризующий эффект, увеличивая тем самым водонепроницаемость. В описании основных характеристик чистящего средства – «Л. О. С.» подчеркивают антибактериальный эффект, что подтверждено клиническим исследованием, проведенным медицинским исследовательским центром РФ [12].

Из вышеперечисленного можно предположить, что чистящее средство – «Л. О. С.» обладает еще поризующим и биоцидным эффектами. Для установления полифункциональности действия, т. е. способности одновременно вызывать несколько эффектов разрабатываемой химической добавки, считаем целесообразным продолжить экспериментальные исследования в этом направлении.

Таблица 5

Прочность бетона на сжатие, с добавкой «Л. О. С.».

№ образца	Класс бетона	Количество добавки от массы цемента (%)		Прочность бетона (МПа)		
		%	мл	Возраст образца (сутки)		
				7	14	28
1	В 20	1	10,2	24,7	26	30,1
2		1,5	15,3	20,5	25	26,1
3		2	20,4	5,2	5,4	6,7
Б <sub>ст</sub>		—	—	20,5	21,3	23,5

На основании проведенных экспериментальных испытаний полученных образцов можно сделать следующие выводы:

- Оптимальная дозировка разрабатываемой химической добавки – многофункционального чистящего средства «L. O. C.», для бетонных и растворных смесей составляет 1%.
- Прочность образцов бетона с 1% химической добавкой – «L. O. C.» повышается на 28% в сравнении с контрольными.

Таким образом, проведенные испытания показали эффективность разрабатываемой химической добавки для бетонных смесей. Многофункциональное чистящее средство –

«L. O. C.» проявляет пластифицирующе-водоредуцирующий эффект. Полученные образцы композиционного материала с разрабатываемой добавкой – «L. O. C.» имеют лучшие эксплуатационные характеристики. Предлагаемая химическая добавка – «L. O. C.» при использовании оптимального количества действует как комплексная добавка, повышая не только пластичность, но и прочность. Основными достоинствами таких химических добавок являются их полифункциональность действия, экологичность и малые дозировки, которые гарантируют экономическую целесообразность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллаев А. М., Абдуллаев М.* Высококачественный и высокоподвижный бетон с комплексными наноструктурными добавками // *Успехи инженерных исследований.* Междунар. Симп. на Инженер. и наук о Земле. (ISEES 2018). С. 228-31.
2. *Аларханова З. З., Батаев Д. К-С.* Модификаторы композиционных материалов на основе цемента // *АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИКА.* Материалы Международной научно-практической конференции. Грозный: АЛЕФ, 2021. С. 77-82.
3. *Аларханова З. З., Ибрагимов И. Б.* Модификация строительных бетонов поверхностно-активным веществом «L. O. C.» // *Вестник КНИИ РАН.* 2021. №4 (8). С. 65-69.
4. *Баженов Ю. М., Батаев Д. К-С., Муртазаев С-А. У., Аларханова З. З., Гойтемиров Р. У., Мажиев Х. Н., Хасбулатова З. С., Батаева П. Д.* Пути улучшения свойств высокопрочных строительных полимерных композитов. // *Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия, том 905, 3-й Международный симпозиум по инженерии и наукам о Земле (ISEES 2020).* Грозный, 2020.
5. *Беднягин С. В., Владимирова Е. Б., Комарова Н. П.* Технология бетона: метод. указания к лабораторным работам. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 52 с.
6. *Бексултанова А. А., Аларханова З. З., Хасбулатова З. С., Батаев Д. К-С.* Поверхностно-активные вещества и их роль в производстве строительных материалов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов.* Грозный: АН ЧР, КНИИ РАН, ЧГУ, ГГНИ, ЧГПИ, 2007. С. 138-141.
7. *Ткачев Е. В., Дронов В. М.* Оценка эффективности поверхностно-активных веществ в цементных системах // *Строительство.* Раздел 4.
8. *Удодов С. А.* Повторное введение пластификатора как инструмент управления подвижностью бетонной смеси // *Сборник научных трудов Кубанского государственного технологического университета.* 2015. №9. С. 175-185.
9. ГОСТ Р 57809-2017/ EN 12350-2:2009. ИСПЫТАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ. Часть 2. М.: Стандартинформ, 2017.
10. ГОСТ 10181-2014. Смесей бетонные. Методы испытаний. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
11. *Stroy-Invest52. ru* URL: <https://stroy-invest52.ru/beton/deopolimernyi-beton.html> (дата обращения: 02.10.2021).
12. *Amway/L. O. C.™* Многофункциональное чистящее средство. <https://www.100sp.ru/good/899006349> (дата обращения: 12.05.2022).
13. Эффективность добавок поверхностно-активных веществ. <http://www.arhplan.ru/materials/concrete/effectiveness-of-surfactant-additives> (дата обращения: 17.08.2022).

14. Добавки в бетон <http://stroivagon.ru> (дата обращения: 22.05.2022).
15. Химические добавки в бетон и раствор. <http://beton-cy47.ru/beton/himik-dobavki.html> (дата обращения: 12.07.2022).
16. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативно-го решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. №1-2. С. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
17. Bataev D. K-S., Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460. <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914222>

## INFLUENCE OF SURFACTANTS – “L. O. C.” ON THE PROPERTIES OF THE COMPOSITE CONCRETE BASED MATERIAL

© Z. Z. Alarkhanova, P. D. Bataeva, I. B. Ibragimov

*Kh. Ibragimov Complex Institute of the RAS, Grozny, Russia*

The paper considers the influence of the surfactant “L. O. C.” on the performance characteristics of a composite material based on concrete, in order to establish its effectiveness as a modifier. Samples of building concrete modified by the developed multifunctional cleaning agent – L. O. C. were made, samples were tested for workability and compressive strength of concrete, taking into account the age of the sample and the dosage of the multifunctional cleaning agent in it, % of the mass of cement. The results of the tests carried out showed that modified with a multifunctional cleaner – “L. O. C.” samples of composite material have the best operational characteristics. The optimal dosage of the developed chemical additive has been established. The main advantage of such chemical additives is their multifunctionality of action, environmental friendliness and small dosages, which guarantee economic feasibility.

**Keywords:** modification, composite material, multifunctional cleaner – “L. O. C.”, anionic and nonionic surfactants.

### REFERENCES

1. Abdullaev, A. and Abdullaev, M. (2018) Vysokokachestvennyi i vysokopodvizhnyi beton s kompleksnymi nanostrukturnymi dobavkami. [High-quality and highly mobile concrete with complex nanostructural additives. Advances in engineering research]. International Symp. to Engineer. and earth sciences. (ISEES 2018), pp. 228-31.
2. Alarkhanova, Z. Z. and Bataev, D. K-S. (2021) ‘Modifikatory kompozitsionnykh materialov na osnove tsementa’. [Modifiers of composite materials based on cement]. Topical issues of modern science: theory, technology, methodology and practice. *Proceedings of the international scientific and practical conference*. Grozny: ALEF. P. 77-82.
3. Alarkhanova, Z. Z. and Ibragimov, I. B. (2021) ‘Modifikatsiya stroitel’nykh betonov poverkhnostno-aktivnym veshchestvom «L. O. C.»’. [Modification of building concrete with surface-active substance “L. O. C.”]. *Bulletin of KNII RAS*. No. 4 (8). pp. 65-69.

4. Bazhenov, Yu. M., Bataev, D. K-S., Murtazaev, S-A. U. Alarkhanova, Z.Z. Goitemirov, R. U. Mazhiev, Kh. N. Khasbulatova, Z. S. and Bataeva, P. D. (2020) 'Puti uluchsheniya svoystv vysokoprochnykh stroitel'nykh polimernykh kompozitov'. [Ways to improve the properties of high-strength building polymer composites]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 905, 3rd International Symposium on Engineering and Geosciences (ISEES 2020), Grozny.
5. Bednyagin, S. V., Vladimirova, E. B. and Komarova, N. P. (2017) Tekhnologiya betona: metod. ukazaniya k laboratornym rabotam. [Concrete technology: method. guidelines for laboratory work]. Yekaterinburg, Publishing House Ural. un-ta. P. 52.
6. Beksultanova A.A. Alarkhanova Z.Z., Khasbulatova Z.S. and Bataev D. K-S. (2007) 'Poverkhnostno-aktivnye veshchestva i ikh rol' v proizvodstve stroitel'nykh materialov. [Surfactants and their role in the production of building materials] '. *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students*. Grozny: Academy of Sciences of the Chechen Republic, KNII RAS, ChGU, GGNI, ChGPI. P. 138-141.
7. Tkachev, E. V. and Dronov, V.M. Otsenka effektivnosti poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v tsementnykh sistemakh. [Evaluation of the effectiveness of surfactants in cement systems]. Construction. Section 4.
8. Udodov, S. A. (2015) 'Povtornoe vvedenie plastifikatora kak instrument upravleniya podvizhnost'yu betonnoi smesi'. [Re-introduction of a plasticizer as a tool for controlling the mobility of a concrete mix]. *Collection of scientific works of the Kuban State Technological University*. No. 9. Pp. 175-185.
9. (2017) ISPYTANIYA BETONNOI SMESI. GOST R 57809-2017 / EN 12350-2:2009. [TESTING CONCRETE MIXTURE]. Part 2. Standartinform, Moscow.
10. (2015) Smesi betonnye. Metody ispytaniy. GOST 10181-2014. [Concrete mixes. Test methods. Introduction]. 2015-07-01. Standartinform, Moscow, p. 24.
11. Available at: Stroy-Invest52. ru URL: <https://stroy-invest52.ru/beton/deopolimernyi-beton.html> (date of access: 02.10.2021).
12. Amway/L. O. C.™ Multi Purpose Cleaner. Available at: <https://www.100sp.ru/good/899006349> (date of access: 05/12/2022).
13. Effektivnost' dobavok poverkhnostno-aktivnykh veshchestv. [Effectiveness of surfactant additives]. Available at: <http://www.arhplan.ru/materials/concrete/effectiveness-of-surfactant-additives>.
14. Dobavki v beton. [Additives in concrete]. <http://stroivagon.ru>
15. Khimicheskie dobavki v beton i rastvor. [Chemical additives in concrete and mortar]. Available at: <http://beton-cy47.ru/beton/himik-dobavki.html>
16. Murtazaev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Nakhaev, M. R. (2020) 'Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v tsementnoi industrii. [Possible alternative solutions to problems in the cement industry]. *Stroitel'nye materialy*. № 1-2. Pp. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
17. Bataev, D. K-S., Murtazayev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Viskhanov, S. S. (2019) 'Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders'. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460. Available at: <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914222>

## ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ

©С.-А. Ю. Муртазаев<sup>1,2</sup>, М. Ш. Саламанова<sup>1,2</sup>, М. М-Я Зайпуллаев<sup>1</sup>, П. А. Кокшев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

<sup>2</sup>КНИИ РАН им. Х. И. Ибрагимова, Грозный, Россия

<sup>3</sup>ЧГУ им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

В работе установлена топологическая модель многокомпонентных наполненных вяжущих систем с использованием минеральных порошков, дающая возможность управлять процессами структурообразования и регулировать конкретный спектр свойств. Модель формирования структуры на основе кремнеземистых минеральных порошков в сочетании с гидратной известью можно выделить как наиболее подходящую для описания модели структурообразования бесклинкерных композитов, с использованием тонкодисперсных минеральных порошков из вторичного и некондиционного сырья, активированных щелочными растворами натрия или калия. Образующие новообразования в диффузионном межфазовом слое представлены гелем кремниевой кислоты, гидросиликатами натрия или калия, гидроалюмосиликатами и гидрогранатами натрия и кальция, кальцитом и являются аналогами природных довольно прочных и долговечных минералов, как щелочных и щелочноземельных цеолитов, слюды, гидрослюды.

**Ключевые слова:** бесклинкерные вяжущие, многокомпонентная система, известково-кремнеземистые вяжущие, диффузионный слой, поровое пространство, контактная зона, активатор, минеральный порошок

Негативное воздействие карбонатной технологии портландцемента активизирует поиск альтернативных бесклинкерных вяжущих. Одной из разновидностей этой группы являются щелочные цементы на основе щелочеактивированного сырья алюмосиликатной природы, что открывает большие возможности для получения многокомпонентных систем. Многокомпонентные щелочные вяжущие системы с использованием активных минеральных добавок изучены недостаточно и требуют тщательного исследования формирования структуры на микро- и макроуровнях. Процессы, протекающие при гидратации в диффузионной контактной зоне, идентичны во многом с аналогичными процессами с известными композиционными вяжущими веществами [2, 3].

Многочисленные исследования подтверждают [1-5], что минеральные добавки в тонкодисперсном состоянии в той или иной степени реагируют с составляющими вяжущих, и в зонах диффузионного межфазового взаимодействия образуются новообразования с связу-

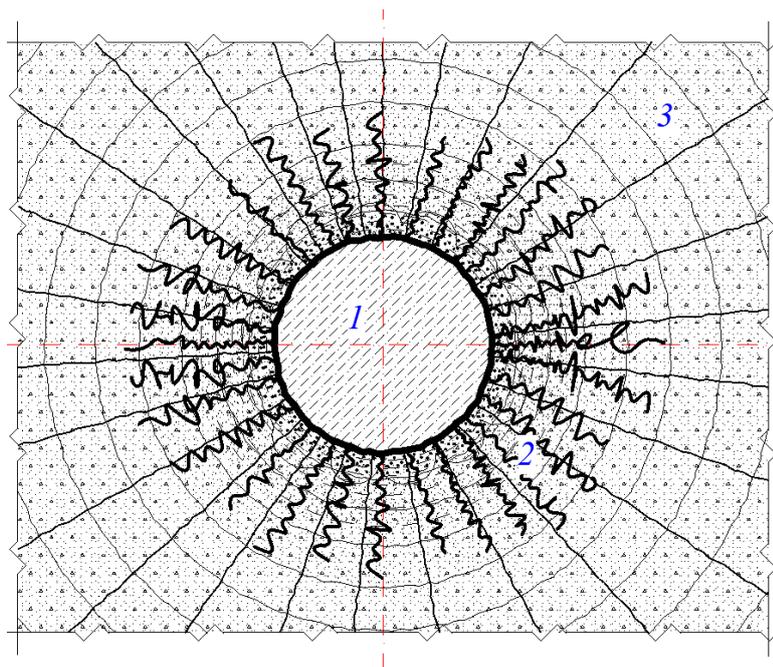
ющими свойствами. Механизм этого взаимодействия можно представить как наполненные цементные системы, а процесс формирования структуры имеет следующую модель:

клинкер + вода → кристаллогидраты клинкера

клинкер + вода + минеральный порошок → кристаллогидраты минеральной добавки.

Исключением в данном случае является механизм гидратации гипсовых вяжущих в присутствии минерального порошка, продуктами этой реакции будут кристаллы двуводрата сульфата кальция, минеральная добавка играет роль наполнителя, заполняющего поровое пространство и улучшающего структуру и свойства камня [6, 7, 10].

Морфология образованных соединений и строение диффузионной межфазовой зоны и пограничного слоя минерального порошка будет зависеть, конечно же, от многих факторов, и в первую очередь от самого вяжущего, степени дисперсности его и минерального порошка, природы наполнителя системы. Модель меж-



**Рис. 1.** Модель межфазовой диффузионной зоны в пограничном слое известково-кремнеземистых соединений:

1 – частицы кварцевой муки; 2 – пограничный слой в виде геля SH+CSH; 3 – объемная фаза извести Ca(OH)<sub>2</sub>,

фазовой зоны в пограничном слое известково-кремнеземистых соединений представлена на рисунке 1.

Модель структуры диффузионной пограничной зоны известково-кремнеземистой композиции довольно изменчива, так как необходимо учитывать многие факторы, такие как твердость минерала, тонкость помола, продолжительность и условия твердения. Если в качестве минерального кремнеземистого порошка плотные породы, то толщина межфазовой зоны зависит от удельной поверхности добавки, так как это повысит растворимость кремнезема, особенно влияние оказывает повышение температуры, да еще в сочетании с давлением насыщенного водяного пара. Гидротермальная обработка способствует увеличению межфазовой зоны и образованию новообразований в пограничном слое типа гидросиликатов низкой основности CSH низкой основности. Необходимо отметить известково-кремнеземистые композиции на минеральных порошках пористой текстуры и аморфной силикатной природы, такие породы, как диатомит, трепел, опока. Модель структурообразования в пограничном слое будет существенно отличаться от преды-

дущей, поровое пространство частиц порошка будет наполнено тоберморитподобными новообразованиями, образованными при химическом взаимодействии кремнезема и гидрокиси кальция.

В многокомпонентных системах (МНС) минеральные добавки – порошки выполняют многофункциональную роль, и в зависимости от многих факторов можно выделить следующее:

- минеральный порошок – наполнитель является заполнителем цементного камня (микробетон) по В. Н. Юнгу [8];
- минеральный порошок – наполнитель вступает в химическое взаимодействие с образованием новых соединений, является хорошим модификатором

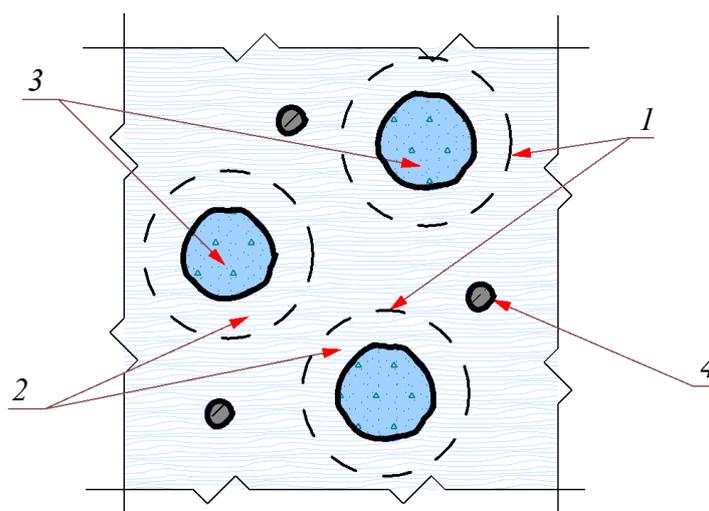
структуры, улучшает свойства многокомпонентной системы [11-14];

- минеральный порошок – наполнитель является кристаллической затравкой вяжущего, используемой при совместном помоле с цементом, активным центром кристаллизации [15].

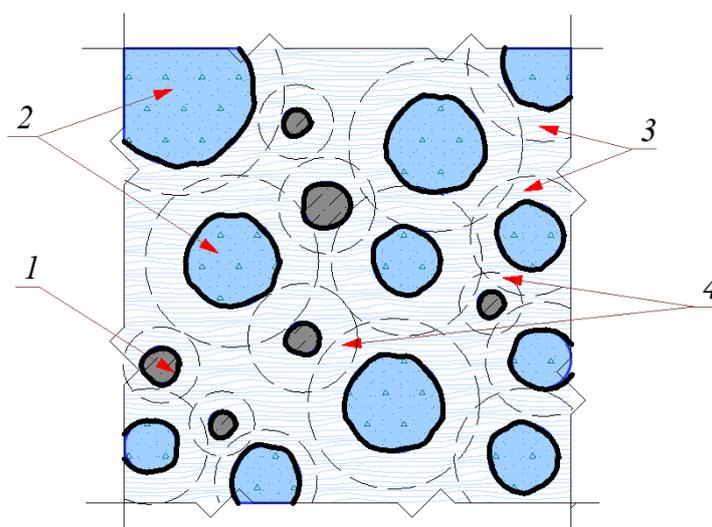
Установлена модель МНС с минеральным порошком – наполнителем, не вступающим в реакцию с клинкерными минералами, можно наблюдать значительную разницу в размерах частиц минерального порошка и зерен портландцемента (рисунок 2).

Топологическая модель многокомпонентной наполненной вяжущей системы, где функции минерального порошка может выполнять добавка с полидисперсным составом, приведена на рисунке 3.

В предлагаемой модели диффузионная межфазовая зона, состоящая из гидратированной клинкерной и минеральной наполненной части, представлена труднорастворимыми гидратными соединениями различной конфигурации, присутствует некоторое количество микропор разного строения. В зависимости от природы минерального порошка и активности,



**Рис. 2.** Модель МНС: 1 – зерна клинкерных минералов; 2 – прореагировавшая межфазная зона; 3 – непрореагировавшая межфазная зона; 4 – частички минерального порошка, не вступающие в реакцию с клинкерными минералами



**Рис. 3.** Модель многокомпонентной вяжущей системы с полидисперсным порошком: 1, 2 – негидратированные части зерен клинкерных минералов и порошка; 3 – гидратированная часть зерна клинкерных минералов; 4 – межфазовая зона вяжущего и наполнителя

состав межфазовой контактной зоны будет отличаться. Присутствие минерального порошка на основе кальциево-магниевого карбонатного порошка (известняк, мел, известняк-ракушечник, магнезит, доломит) при гидратации с клинкерными минералами позволит получать такие прочные соединения, как гидрокарбона-

ты кальция  $\text{CaO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  и магнезия  $\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Использование минеральных тонкодисперсных порошков алюмосиликатной природы позволит получать гидрокарбоалюмосиликаты  $\text{CaO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , гидрокарбоалюминаты  $\text{CaO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{Ca}$

$\text{CO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  и гидрокарбоферритами  $\text{CaO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  кальция и магния [16, 17].

Минеральные ультрадисперсные реакционноспособные порошки с размером микро-частичек  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-9}$  м практически полностью вступают в химические реакции с составляющими портландцемента, образуя дополнительные порции низкоосновных тоберморитподобных гидросиликатов кальция и других труднорастворимых новообразований (рисунок 4).

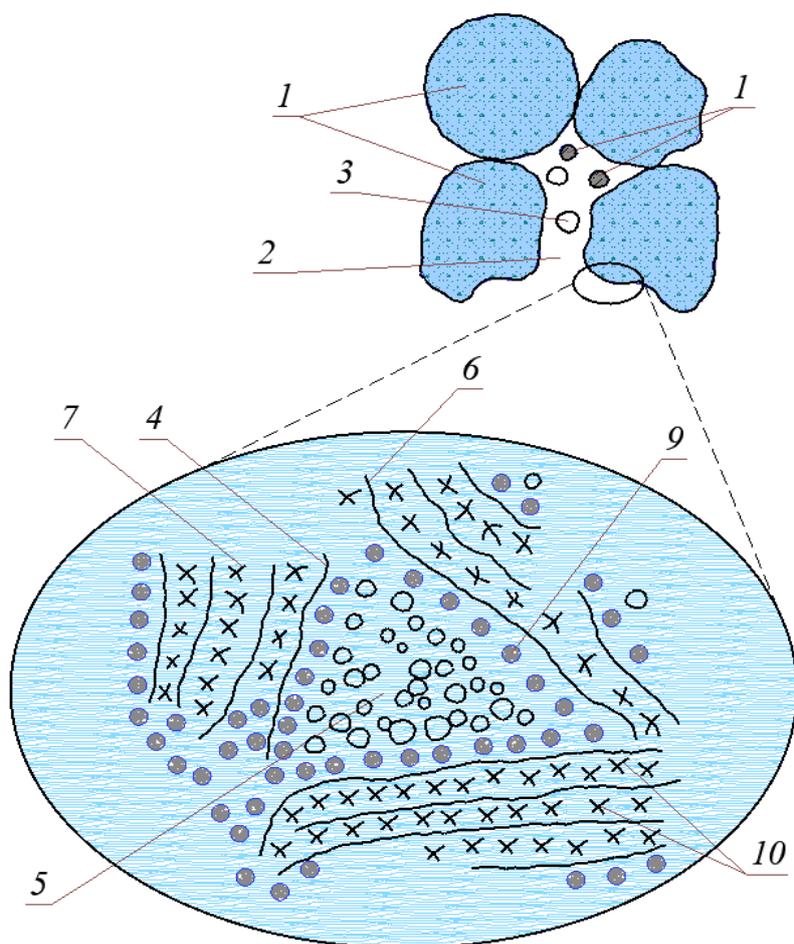
Ультрадисперсные частицы минеральных порошков в силу наличия активных центров кристаллизации на своей поверхности усиливают адгезионную прочность между частицами, повышают прочностные характеристики и трещиностойкость, препятствуют усадочным деформациям.

Исследование контактной диффузионной межфазовой зоны является довольно ответственным процессом, так как именно это звено

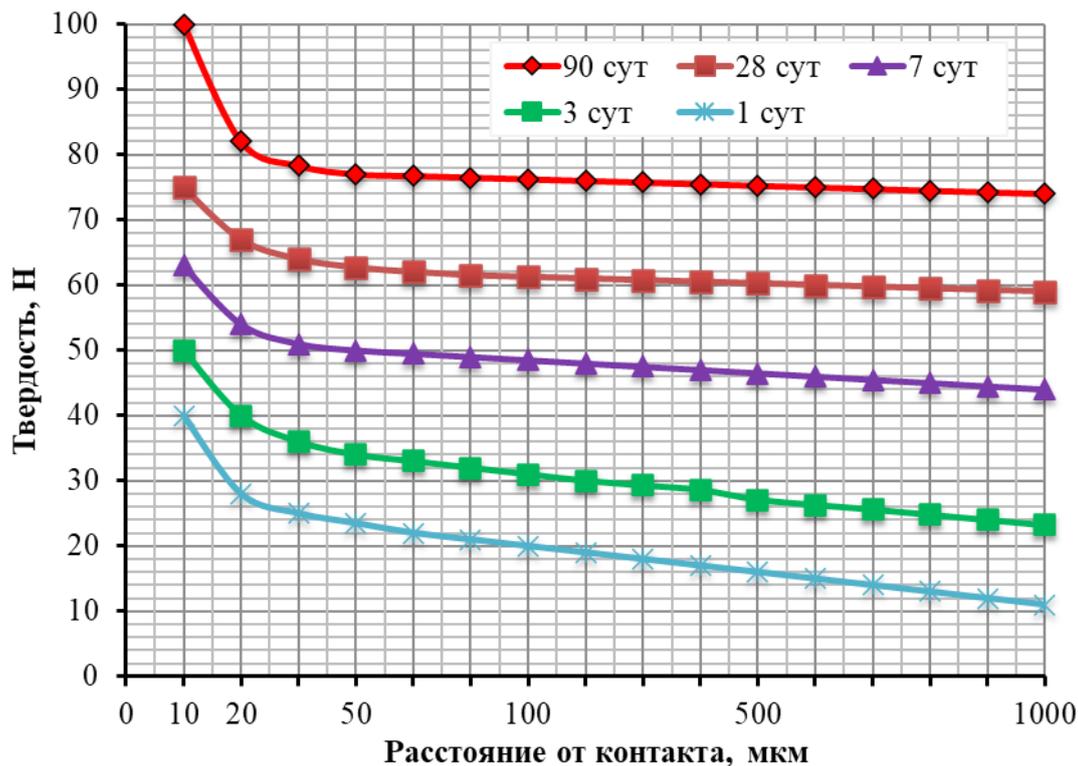
в наполненных композициях определяет адгезионную прочность и прочность системы в целом. Особенного внимания заслуживает такое свойство зоны диффузионного контакта – твердость на микроскопическом уровне.

В работе [16] установлено, что прочность многокомпонентных цементных систем зависит от твердости диффузионного пограничного слоя. Проведенные исследования пограничной диффузионной зоны показали, что твердость на микроуровне на границе с такими порообразующими минералами, как кварц, кальцит, полевошпат, плагиоклаз и др., выше по сравнению с твердостью объемной фазой, в 3-7 раз и, безусловно, учитываются и условия твердения системы.

Из перечисленных минералов необходимо отметить минеральный порошок из кварцевой муки, который показал максимальную твердость диффузионной межфазовой зоны, толщина которой составляет всего лишь 20-40 мкм, при этом этот показатель оставался неизмен-



**Рис. 4.** Модель диффузионного межфазового геля CSH с использованием ультрадисперсных активных порошков: 1 – частица геля; 2, 4 – плотный контакт; 3 – поры между частичками; 5 – внутрикристаллизационные микропоры; 6 – водная прослойка; 7 – междукристаллизационная микропора; 8, 9 – частички ультрадисперсного порошка размера  $(2-200) \cdot 10^{-9}$  м



**Рис. 5.** Зависимость твердости на микроуровне (Н, кг/мм<sup>2</sup>) от толщины диффузионной межфазовой пограничной зоны

ным на протяжении всего процесса проведения исследования (рисунок 5).

Все представленные топологические модели МНС дают нам представление о механизме формирования структуры цементного камня, но модель формирования структуры на основе кремнеземистых минеральных порошков в сочетании с гидратной известью можно выделить как наиболее подходящую для описания модели структурообразования бесклнкерных композитов, с использованием тонкодисперсных минеральных порошков из вторичного и некондиционного сырья, активированных щелочными растворами натрия или калия. В качестве минеральных порошков можно применять отходы черной металлургии, золу-унос, каолиновые глины, эндогенные и экзогенные кислые породы [18-24].

Образуемые новообразования в диффузионном межфазовом слое будут отличаться от выше исследованных, и продуктами реакций будут гель кремниевой кислоты, гидросиликаты натрия или калия, гидроалюмосиликаты

и гидрогранаты натрия и кальция, кальцит. Полученные соединения являются аналогами природных довольно прочных и долговечных минералов, как щелочных и щелочноземельных цеолитов, слюды, гидрослюды [24].

Установлена топологическая модель многокомпонентных наполненных вяжущих систем с использованием минеральных порошков, дающая возможность управлять процессами структурообразования и регулировать конкретный спектр свойств. Модель формирования структуры на основе кремнеземистых минеральных порошков в сочетании с гидратной известью можно выделить как наиболее подходящей для описания модели структурообразования бесклнкерных композитов, с использованием тонкодисперсных минеральных порошков из вторичного и некондиционного сырья, активированных щелочными растворами натрия или калия. Образуемые новообразования в диффузионном межфазовом слое представлены гелем кремниевой кислоты, гидросиликатами натрия или калия, гидроалюмосиликатами и гидрогра-

натами натрия и кальция, кальцитом и являются аналогами природных довольно прочных и долговечных минералов, как щелочных и щелочно-земельных цеолитов, слюды, гидрослюды.

Таким образом, представлены топологи-

ческие модели многокомпонентных наполненных вяжущих систем с использованием минеральных порошков, позволяющие регулировать процесс структурообразования и конкретный спектр свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014. №2. Pp. 16-27.
2. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Нахаев М. П. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin- Based Geopolymer // Materials. 2016. Vol. 9. Pp. 767.
4. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Сайдумов М. С., Исмаилова З. Х. Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок // Научный журнал «Современная наука и инновации». 2017. №2 (18). С. 168-175.
5. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т. 46). С. 65-70.
6. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 23-27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385-388. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0\\_93](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_93)
7. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // Cement and Concrete Research. 2016. Pp. 163-173.
8. Рахимова Н. П. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. 2008. №9. С. 77-80.
9. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // ACJ Materials Journal. 2004. Vol. 101. Pp. 467-472.
10. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 pp.
11. Корнеев В. И., Данилов В. В. Растворимое и жидкое стекло. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 с.
12. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq. Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. № 75. Pp. 908-914.
13. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102-107.
14. Villa C., Pecina E. T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 2084-2090.
15. Рахимова Н. П., Рахимов Р. З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 204-216.
16. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Mintsaeв M. Sh., Bisultanov R. G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences

- and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
17. Bataev D. K-S., Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Viskhanov S. S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>
  18. Рахимов М. М., Хабибуллина Н. Р., Рахимов Р. З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // Цемент и его применение. 2016. №3. С. 96-99.
  19. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers // Journal of Materials Science. Vol. 42. №9. 2007. Pp. 3033-3043.
  20. Pawlasova S., Skvara F. High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // Alkali Activated Materials. 2008. Pp. 523-525.
  21. Khater H. M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // Advances in Nano Research. 2015. Vol. 3. №4. Pp. 225-242.
  22. Khater H. M., El Nagar A. M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog /Ceramic Wastes Geopolymer Bricks // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37-46.
  23. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // Int. J. Chem. Sci. 2016. №14 (Vol. 1). Pp. 115-126.
  24. Саламанова М. Ш., Нахаев М. Р., Исмаилова З. Х. Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклинкерного вяжущего щелочной активации // Международный научно-исследовательский журнал «Строительные материалы и изделия». 2020. Т. 3. №1. С. 21-29. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-21-29>

## TOPOLOGICAL MODELS OF THE STRUCTURE OF THE DIFFUSION LAYER OF MULTIPONENT BINDERS

©S-A. Yu. Murtazaev<sup>1,2</sup>, M. Sh. Salamanova<sup>1,2</sup>, M. M-Ya. Zaipulaev<sup>1</sup>, P.A. Kokshev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

<sup>2</sup>Kh. Ibragimov Complex Institute of the RAS, Grozny, Russia

<sup>3</sup>ChSU named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

The paper establishes a topological model of multicomponent components of binder systems using mineral powders, which makes it possible to control the process of structure formation and determine specific spectral properties. Structure structure model based on models of siliceous mineral powders in concentration with hydrated lime, which can be distinguished as the most suitable for describing the structure formation of clinker-free composites using finely dispersed mineral powders from secondary and substandard raw materials activated with alkaline solutions of sodium or potassium.

The new formations formed in the diffusion interfacial layer are represented by silicic acid gel, sodium or potassium hydrosilicates, hydroaluminosilicates and sodium and calcium hydrogarnets, calcite and are analogues of natural rather strong and durable minerals, such as alkaline and alkaline earth zeolites, mica, hydromica.

**Keywords:** clinker-free binders, multicomponent system, lime-silica binders, diffusion layer, pore space, contact zone, activator, mineral powder

## REFERENCES

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. [Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*]. 2014. №2. Pp. 16-27.
2. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh. and Nakhaev M.R. (2020) 'Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v tsementnoi industrii'. *Stroitel'nye materialy*. [Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry. *Construction materials*]. №1-2. Pp. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. (2019) [Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*]. Vol. 9. Rr. 767.
4. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh., Saidumov, M. S. and Ismailova, Z. Kh. (2017) 'Vliyanie aktivnykh tsemtrov poverkhnosti na reaktsionnyuyu sposobnost' mineral'nykh dobavok'. *Nauchnyi zhurnal «Sovremennaya nauka i innovatsii»*. [Influence of surface active centers on the reactivity of mineral additives. *Scientific journal "Modern Science and Innovations"*]. №2 (18). Pp. 168-175.
5. Murtazaev S-A. Yu., Salamanova M. Sh. (2018) 'Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoi prirody'. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. [Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. *Privolzhsky scientific journal*]. №2 (T. 46). Pp. 65-70.
6. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 23-27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385-388. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0\\_93](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_93)
7. Zhang, Z., Provis, J. L., Zou, J., Reid, A. and Wang, H. (2016) 'Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture'. *Cement and Concrete Research*. Pp. 163-173.
8. Rakhimova, H. P. (2008) 'State and perspective directions of development of research and production of composite slag-alkaline binders, mortars and concretes'. *Stroitel'nye materialy*. №9. P. 77-80.
9. Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. and Rangan, B. (2004) On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACJ Materials Journal*. Vol. 101. Pp. 467-472.
10. Davidovitz, J. (2008) *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 592 pp.
11. Korneev, V. I. and Danilov, V. V. (1996) *Soluble and liquid glass*. St. Petersburg. Stroyizdat. 216 p.
12. Fadhil, Nuruddin M., Demie, S., Fareed, Ahmed M. and Nasir Shafiq. (2011) Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self- Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. №75. Pp. 908-914.
13. Alex, T. C., Nath, S. K., Kumar, S., Kalinkin, A. M., Gurevich, B. I., Kalinkina, E. V. and Tyukavkina, V. V. (2013) 'Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere'. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 216. Pp. 102-107.
14. Villa, C., Pecina, E. T., Torres, R. and Gomez, L. (2010) 'Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite'. *Construction and Building Materials*. Vol. 24. Pp. 2084-2090.
15. Rakhimova, N. R. and Rakhimov, R. Z. (2013) 'Kompozitsionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami razlichnogo tipa aktivnosti'. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. [Composite slag-alkaline binders with mineral additives of various types of activity. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*]. 2013. №16. Pp. 204-216.
16. Murtazayev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh., MintsaeV, M. Sh. and Bisultanov, R. G. (2019) 'Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging'. *Proceedings of*

- the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 50-503, available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
17. Bataev, D. K-S., Murtazayev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Viskhanov, S. S. 'Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders'. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460, available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>
  18. Rakhimov, M. M., Khabibullina, N. R. and Rakhimov, R. Z. (2016) 'Mekhanizm otverzheniya boratnykh solevykh rastvorov shlakoshchelochnymi vyazhushchimi'. *Tsement i ego primenenie*. [The mechanism of curing of borate salt solutions with slag-alkaline binders. Cement and its application]. №3. P. 96-99.
  19. Dombrowski, K. (2007) 'The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers'. *Journal of Materials Science*. Vol. 42. №9. Pp. 3033-3043.
  20. Pawlasova, S. and Skvara, F. (2008) 'High-Temperature Properties of Geopolymer Materials'. *Akali Activated Materials*. Pp. 523-525.
  21. Khater, H. M. (2015) 'Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT'. *Advances in Nano Research*. Vol. 3. №4. Pp. 225-242.
  22. Khater, H. M., El Nagar, A. M. and Ezzat, M. (2016) 'Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks'. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37-46.
  23. Nagajothi, S. and Elavenil, S. (2016) 'Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand'. *Int. J. Chem. Sci.* №14 (Vol. 1). Pp. 115-126.
  24. Salamanova, M. Sh., Nakhaev, M. R. and Ismailova, Z. Kh. (2020) 'Zakonomernosti protekaniya protsessov formirovaniya struktury i prochnosti besklinkernogo vyazhushchego shchelochnoi aktivatsii'. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal «Stroitel'nye materialy i izdeliya»*. [Patterns of the processes of formation of the structure and strength of a clinker-free binder of alkaline activation. International Research Journal "Building Materials and Products"]. V. 3. №1. Pp. 21-29. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-21-29>

## БИТУМНО-ПОЛИМЕРНЫЕ СТЫКОВОЧНЫЕ ЛЕНТЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

© А. Б. Санакулов<sup>1</sup>, Е. В. Лебедев<sup>2</sup>, Д. Ю. Небрятенко<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>МАДГТУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский университет транспорта, Москва, Россия

<sup>4</sup>МИРЭА – РТУ, Москва, Россия

Стабильность эксплуатационных свойств асфальтобетонных дорожных покрытий обеспечивает необходимый уровень безопасности транспортного сообщения на всей территории России. Не оставляя без внимания вопросы дорожного материаловедения, касающиеся состава и свойств компонентов асфальтобетонных и полимерасфальтобетонных смесей, в данной работе сделан новый шаг в направлении изучения способов обеспечения монолитности покрытий нежестких дорожных одежд. Изучена возможность применения битумно-полимерных стыковочных лент для предотвращения разрушений в местах продольных и поперечных стыков верхних слоев дорожных одежд. Новый строительный материал представляет собой ленту из битумно-полимерного композита, способного сохранять первоначальную геометрическую форму при достаточно высоких температурах в течение всего периода хранения до момента его применения. Работы по укладке покрытий с применением битумно-полимерных стыковочных лент проведены на дорожных объектах в нескольких регионах Российской Федерации. Проводится мониторинг состояния швов сопряжения.

**Ключевые слова:** ленты стыковочные битумно-полимерные, полимерно-битумные вяжущие (ПБВ), продольные и поперечные швы сопряжения.

Современные автомобильные дороги, вне зависимости от типа дорожных одежд и применяемых дорожно-строительных материалов, постоянно подвержены экстремальным нагрузкам вследствие высокой интенсивности движения и роста объемов грузовых перевозок тяжеловесным транспортом [1, 2]. Долговечность и бездефектность покрытия является одним из основных показателей, обеспечивающих выполнение главной задачи автомобильных дорог – возможности беспрепятственного проезда автомобильного транспорта в нужном направлении при любых погодных условиях. Чтобы не выходить за рамки отведенного бюджета и своевременно восстановить движение транспорта после ремонта, его необходимо проводить просто и быстро, независимо от температурных и погодных условий. При этом необходимо соответствовать все более жестким эксплуатационным требованиям, а значит заблаговременно предусматривать и предот-

вращать причины возможных разрушений и также отрабатывать различные варианты технологических решений потенциально возникающих проблем [3]. Одна из таких проблем – это нарушение монолитности асфальтобетонных и полимерасфальтобетонных покрытий в зонах швов сопряжения.

Разрушения асфальтобетонных покрытий возможны по многим причинам: используемые материалы и технологии, транспортно-эксплуатационные условия, а также природно-климатические условия региона расположения дорожного объекта [4]. Но есть среди них и причины, закладываемые изначально, еще на этапе проведения дорожно-строительных работ. Таковыми являются технологические стыки покрытий в продольном и поперечном направлениях, швы и соединения полос асфальтобетонных покрытий, места примыканий к металлическим, цементным и железобетонным конструкциям и т. п.



**Рис. 1.** Внешний вид: ленты стыковочной битумно-полимерной (а), рулона ленты перед упаковкой (б), рулона ленты перед укладкой в шов сопряжения (в)

Эффективным средством борьбы с образованием трещин на месте различных швов и поверхностных сочленений в рамках дорожной инфраструктуры представляются новые дорожные материалы – стыковочные битумно-полимерные ленты.

Способность битумного вяжущего из свежего слоя асфальтобетонной смеси проникать в граничные слои уложенного ранее слоя асфальтобетона и обеспечивать равномерное обволакивание каменного материала с целью его удержания в составе смеси является ценным свойством качественного дорожного вяжущего, обеспечивающего монолитность конструкции и препятствующего раскрытию продольного или поперечного стыка дорожного полотна.

При этом очевидно, что полимерно-битумное вяжущее (ПБВ), в силу особенностей строения входящих в его состав высокомолекулярных компонентов, будет справляться с данной задачей лучше, чем традиционный битум нефтяной дорожный вязкий (БНД), и обеспечивать лучшие показатели покрытия на протяжении всего срока его эксплуатации [5, 6]. С целью решения практической задачи увеличения безремонтных сроков эксплуатации дорожных покрытий необходимо разобраться в причинах данных явлений и способах их предотвращения и ремонта, в том числе с применением битумно-полимерных стыковочных лент.

Для понимания и успешного разрешения сложных технологических задач важно обо-

значить приоритетность рассматриваемых задач и выяснять подходы к их решению с минимальными материальными и экономическими затратами [7]. Поэтому логично обратиться к первопричинам проблем неудовлетворительного крепления элементов дорожных одежд и повышению адгезионной прочности в зоне контакта.

Существует не много физико-химических явлений, которые были бы столь многообразны, как явления, объединенные термином адгезия. В многочисленных фундаментальных и практических, экспериментальных, методических и теоретических исследованиях показано, что специфика адгезионных связей зависит от природы контактирующих фаз, состава и структуры субстрата и адгезива, формы и размеров тел, условий, определяющих процесс сближения и разъединения фаз [5, 8-19].

С точки зрения Б. В. Дерягина [9], «прилипание» адгезива к субстрату есть «процесс», а «адгезия» – это количественная мера его результата. В настоящее время «прилипание» рассматривают как процесс формирования контакта между адгезивом и субстратом, то есть образования адгезионной зоны, а «адгезию» – как процесс разрушения соединений, т. е. как меру прочности адгезионного соединения [3, 10].

Таким образом, основные процессы для рассматриваемых систем можно интерпретировать следующим образом:

I. Химической природой поверхностного слоя щебня – щелочные породы склеиваются битумными составами лучше, чем кислые из-за наличия на поверхности гидроксильных групп, склонных к химическому и ван-дер-ваальсовому взаимодействию с поверхностным слоем вяжущего, «заокисленному» в силу взаимодействия с кислородом воздуха. Кроме того, российские марки дорожных битумов еще и сильно окислены на стадии производства, а протекание окислительно-восстановительных реакций на поверхности щебня возможно при наличии на них противоионов в виде гидроксильных групп. Важную роль здесь играет и явление смачивания [11].

II. Геометрия поверхности каменного материала, наличие макро- и микроразветвленности поверхности, микродефектов, открытых полостей, каверн, обеспечивающих возможность проникновения, диффузии и заклинивания в открытых полостях внешнего слоя каменных материалов компонентов вяжущего, прежде всего высокомолекулярных цепей. Полимерная макромолекула при этом становится якорем, поскольку основная ее часть находится в объеме вяжущего, но и в поры каменного материала проникла уже достаточная часть цепи для обеспечения прочной связи (при условии массовости этого явления в граничном слое) [12, 13].

III. Физико-химическая природа вяжущего. С одной стороны, вяжущее должно содержать низкомолекулярные компоненты, обладающие значительной подвижностью и способные проникать в массив смежного материала на значительную глубину. Для этого они должны обладать малыми размерами и сферической формой. С другой стороны, только высокополимерные материалы из состава вяжущего обладают достаточной прочностью и длиной цепи, способной, проникнув в поры каменного материала, оставаться в массиве или приграничном слое вяжущего. Именно возможность переплетения полимерных цепей без образования химической связи в месте перехлестывания обеспечивает возможность высоких прочностных показателей в местах склеивания щебенистых компонентов смеси, гарантируя эластичность и значительную растяжимость

вяжущего материала без разрушения. Это и есть причина проявления когезии у ПБВ [14, 15].

IV. Условия проведения процесса образования контакта между твердой каменной поверхностью и вяжущим. Это, прежде всего, температура, активирующая протекание физических и химических процессов как на границе раздела фаз, так и в объеме каждой отдельно взятой фазы [16, 17].

Учитывая тот факт, что нефтяные битумы условно состоят их трех больших групп химических соединений – масел, смол и асфальтенов, – то очевидно, что крупные асфальтеновые комплексы могут или относительно свободно перемещаться при высоких температурах в смолисто-масляной прослойке, или масляно-смоляные компоненты битума будут окклюдированы на поверхности крупных асфальтеновых агломератов (в зависимости от способа производства и компонентного состава рассматриваемого битума).

При включении в состав битумной композиции СБС-полимеров (бутадиен-стирольных термоэластопластов), представляющих единую, химически сшитую систему двублочных высокомолекулярных полимеров – полистирола и полибутадиена, мальтеновая фаза начинает поглощаться полимерными доменами и одновременно доокисляться до низкомолекулярных смол вследствие увеличения количества свободного кислорода, попадающего из воздуха в объём композиции при замешивании СБС-полимеров и вытесняемого из поверхностных пор, расположенных на частицах полимера. Поэтому первоначальная вязкость композиции увеличивается, при этом повышаются и адгезионные свойства в поверхностных слоях [18, 19].

Внедрение контрактов жизненного цикла привело к тому, что в течение последних трех лет при проведении дорожных работ наблюдается всплеск активного применения битумных лент различного состава и назначения. Применение стыковочных битумно-полимерных лент не вызывает сложностей у персонала и не увеличивает время проведения основных технологических операций. Однако для первичного освоения целесообразно не только сформу-



**Рис. 2.** Картонный барабан с металлическим обрамлением (а), извлечение ленты стыковочной битумно-полимерной из барабана (б), послойное размещение рулонов ленты в барабане (в)

лизовать требования к новому материалу и к последовательности проводимых с ним операций, но и привести иллюстративный материал, позволяющий наглядно показать особенности работы с прогрессивными инновациями [20].

Изначально необходима предварительная подготовка рабочей поверхности объекта укладки, заключающаяся в освобождении обрабатываемых участков асфальтобетонного, полимерасфальтобетонного или цементобетонного покрытия от различного рода загрязнений: пыли, грязи, наледи, снега и т. д. [7, 21]. Эффективное применение стыковочной ленты без предварительной подготовки возможно осуществить при температуре окружающей среды не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Для обеспечения должного уровня технологических свойств матери-

ала, при температуре окружающей среды ниже  $+10^{\circ}\text{C}$ , ленту необходимо выдержать в сухом помещении с температурой  $+15^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$  в течение не менее 24 часов.

Процесс применения стыковочных битумно-полимерных лент не сложный и может быть представлен следующим образом.

1. Битумно-полимерная лента поставляется свернутой в рулон (с промежуточной антиадгезионной прослойкой между ее слоями), упакованной в картонно-навивные цилиндрические барабаны.

2. Перед началом работ с горловины барабана сбивается металлический обод. Рулон извлекается из картонной упаковки и, в случае отсутствия необходимости использовать рулон лентой полностью, нарезается на куски необхо-



**Рис. 3.** Картонный барабан с информацией о ленте (а), раскладка рулонов ленты вдоль образуемого шва сопряжения (б), антиадгезионный прокладочный слой для предотвращения слипания рулонов ленты при транспортировке и хранении (в)



**Рис. 4.** Разматывание, укладка, прижатие ленты по поверхности шва и снятие антиадгезионного слоя (а, б), вид готового шва перед укладкой горячей асфальтобетонной или полимерасфальтобетонной смеси (в)

димой длины. Затем рулоны ленты распределяются вдоль кромки шва на расстоянии около 10 метров

3. Лента располагается на поверхности ранее уложенного покрытия так, чтобы защитный антиадгезионный слой был сверху, разматывается и укрепляется вдоль кромки слоя покрытия легкими периодическими надавливаниями ног. Она фиксируется на боковой грани покрытия, а затем с ее поверхности удаляется защитный антиадгезионный слой. При соединении следующего рулона ленты осуществляется встык.

4. Завершающей стадией является укладка горячей асфальтобетонной или полимерасфальтобетонной смеси в зонах швов со смежным асфальтобетонным покрытием и образование непрерывного монолитного шва между

старым и вновь укладываемым асфальтобетоном.

В результате процессов образования вертикального стыковочного шва между ранее уложенным и свежим слоем асфальтобетонного или полимерасфальтобетонного покрытия последовательно происходит ряд физических, химических и механических преобразований дорожно-строительных материалов, приводящих к формированию монолитной зоны шва.

Во-первых, при разворачивании рулона стыковочной ленты ее свежая поверхность, обращенная к антиадгезионному шву, размещается вдоль первоначальной поверхности стыка п. 1 и 2. При кратковременном надавливании на внешний слой ленты, ее обращенный к поверхности слой деформируется вокруг выступающих частиц каменного материала



**Рис. 5.** Распределение горячей асфальтобетонной или полимерасфальтобетонной смеси (а), укатка сформированного слоя (б), вид готового шва в итоговом покрытии (в)

исходного слоя асфальтобетона и проникает в поверхностные каверны, углубления и поры, что увеличивает удельную поверхность контакта стыковочной битумно-полимерной ленты со слоем субстрата. Наличие в составе ленты полимерных компонентов обеспечивает необходимый уровень адгезионного взаимодействия в зоне контакта (п. 3). Они обеспечивают надежное примыкание стыковочной ленты к боковой поверхности ранее уложенного асфальтобетона на период проведения остальных мероприятий, необходимых для укладки свежего слоя асфальтобетонной или полимерасфальтобетонной смеси (п. 4). В момент размещения горячей смеси в зоне примыкания стыковочная битумно-полимерная лента прогревается, реологические свойства композита улучшаются, а компоненты ленты проникают не только в приповерхностные слои свежего асфальтобетона, но и дополнительно проникают в массив ранее уложенного слоя (п. 5). Подробное изучение механизма протекания физико-химических процессов в зоне образования шва сопряжения еще предстоит, но очевидно, что указанные процессы имеют решающее значение для обеспечения монолитности шва и увеличения периода его безремонтной эксплуатации.

Необходимо отметить, что вышеуказанные этапы применения стыковочных лент были отработаны опытным путем и подтверждены в течение последних пяти лет на дорожных объектах различного уровня подчиненности в нескольких природно-климатических зонах Российской Федерации. В настоящее время на них

ведется систематический мониторинг состояния объектов применения стыковочных битумно-полимерных лент. Оценивается не только компонентный состав битумно-полимерного композита для изготовления ленты (марка и показатели исходного вяжущего, содержание и свойства применяемых модификаторов, процентное содержание и соотношение компонентов), но и геометрические размеры стыковочной ленты (ширина, толщина, наличие фаски) и свойства антиадгезионных материалов, используемых при формировании рулона ленты. В ряде случаев рассматривается использование клеевых составов на внутренней поверхности стыковочной битумно-полимерной ленты для обеспечения технологической стабильности шва сопряжения, как правило, при проведении работ при пониженных температурах.

В результате анализа данных, полученных в рамках проведенных исследований, можно сделать вывод о доступности нового дорожно-строительного материала для применения, отсутствия необходимости приобретения дополнительных технических средств для его использования и достаточности существующего уровня квалификации сотрудников отрасли для выполнения необходимых технологических операций. С целью статистического и документального подтверждения целесообразности использования стыковочных лент различного состава для предотвращения трещинообразования в швах сопряжения и последующего разрушения монолитности дорожного полотна в приграничной зоне, работы в данном направлении будут продолжены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Муртазаев С-А. Ю.* Испытание грунтов оснований под здания и сооружения / С-А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, А. А. Габашев // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. № 1 (27). 2022. С. 77-83.
2. *Мушреф Х. Ш.* Нефтяные дорожные битумы: нормативы, качество, технологии, перспективы / Х. Ш. Мушреф, Ю. А. Кутьин, Э. Г. Теляшев // Нефтегазовое дело. № 6. 2012. С. 532-542.
3. *Гохман Л. М.* Применение качественного полимерно-битумного вяжущего для условий России / Л. М. Гохман // Дороги России. № 1. 2018. С. 39-55.
4. *Ахмадова Х. Х.* Основные способы модификации битумов различными добавками / Х. Х. Ахмадова, Ж. Т. Хадисова, Л. Ш. Махмудова, З. А. Абдулмежидова, М. А. Мусаева // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. № 3 (17). 2019. С. 42-56.

5. *Гохман Л. М.* Дорожный полимерасфальтобетон. М.: Изд. «Экон-Информ», 2017. 477 с.
6. *Тарамов Ю. Х.* Влияние состава битума на эксплуатационные свойства / Ю. Х. Тарамов, П. С. Цамаева, А. А. Эльмурзаев // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. № 1 (27). 2022. С. 54-62.
7. *Барковский Д. В.* Технология устройства продольных швов сопряжения асфальтобетонных покрытий. Мировой опыт / Д. В. Барковский, М. А. Высоцкая // БГТУ им. В. Г. Шухова. № 6. 2016. С. 16-24.
8. *Чалых А. Е.* Фундаментальные проблемы адгезионных взаимодействий в полимерных системах / А. Е. Чалых, А. А. Щербина // Адгезионные материалы: труды научно-технической конференции Москва, ВИАМ. 27 апрель 2016 г. С. 36-51.
9. *Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П.* Адгезия твердых тел. М.: Изд. АН СССР, 1973. 280 с.
10. *Туторский И. А., Потапов Е. Э., Шварц А. Г.* Химическая модификация эластомеров М., «Химия», 1993. –304 с.
11. *Золотарев В. А.* Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны: в 2 ч. Ч. 1: Дорожные битумные вяжущие / В. А. Золотарев. Х.: ХНАДУ, 2014. 180 с.
12. *Галдина В. Д.* Модифицированные битумы: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2009. 228 с.
13. *Лушников Н. А.* Об определении некоторых геометрических характеристик колеи на проезжей части автомобильной дороги / Н. А. Лушников, П. А. Лушников, Д. И. Ковалев, В. А. Кретов // Дороги и мосты. № 2 (46). 2022. С. 95-99.
14. *Гохман Л. М.* Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС / Л. М. Гохман. М.: Изд. «Экон-Информ», 2004. 584 с.
15. *Nebratenko D. Yu.* Influence of SBS polymers of various structure on the properties of semi-blown bitumen binders / D. Yu. Nebratenko, Boksha M. Yu., Isakov A. M. Roads and Bridges – Drogi i Mosty 21 (2022). Pp. 5-17.
16. *Горельщикова Л. А.* Теоретические аспекты систематизации добавок, улучшающих свойства битумного вяжущего и асфальтобетонной смеси / Л. А. Горельщикова // Дороги и мосты. № 2 (42). 2019. С. 203-236.
17. *Новикова Е. Х.* Развитие полимерных решений для дорожной отрасли / Е. Х. Новикова // Каучук и резина. Том 80. № 5. 2021. С. 272-275.
18. *Polonik V.D.* The Results of the Compromise Task Solution Directed for Development of Polymer-Modified Binder / V.D. Polonik, A.S. Kukleva, N.D. Avdeev, M.D. Shlyaptseva, V.G. Nikol'skii, I.V. Gordeeva, S.V. Kotova // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 899. P. 67-72, 2021. ISSN: 1662-9795
19. *Kashevskaya E. V.* Závislosti vlivu struktury polymerů SBS na vlastnosti polofoukaných a oxidovaných asfaltových pojiv / E.V. Kashevskaya, M.Yu. Boksha, A.M. Isakov, D.Yu. Nebratenko // Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek. ASFALTOVÉ VOZOVKY, 2021. Pp. 2-3.
20. *Герман Е. А.* Теоретическая инноватика: учеб. пособие / Е. А. Герман. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. 148 с.
21. *Муртазаев С-А. Ю.* Мокрый способ приготовления жидкого стекла на кремнеземистых добавках / С-А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, Ю. И. Корянова // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. № 2 (24). 2021. С. 82-91.

## BITUMEN-POLYMER JOINT TAPES FOR REINFORCING THE UPPER LAYERS OF ROADS

© A. B. Sanakulov<sup>1</sup>, E. V. Lebedev<sup>2</sup>, D. Yu. Nebratenko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>MSARTU, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Financial University under the Government of Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>3</sup>RUT, Moscow, Russia

<sup>4</sup>MIREA – RTU, Moscow, Russia

The stability of the performance properties of asphalt concrete road pavements provides the necessary level of traffic safety throughout Russia. Without neglecting the issues of road material science concerning the composition and properties of the components of asphalt-concrete and polymer-asphalt-concrete mixtures, this work takes a new step toward studying other ways to provide a continuous surface of non-rigid road pavements. The possibility of using the bituminous-polymer joint tapes to prevent failures in the places of longitudinal and transverse joints of the top layers of the road pavement is studied. The new construction material is a strip of bituminous-polymer composite which is able to keep its original geometrical shape at rather high temperatures during the whole period of storage up to the moment of its application. The works on laying the coatings with the use of bituminous-polymer joint tapes are conducted on the road objects in several regions of the Russian Federation. The condition of the joints of the joints is monitored.

**Keywords:** bitumen-polymer tapes, polymer-bituminous binders (PmB), longitudinal and transverse mating joints.

### REFERENCES

1. Murtazaev, S-A. Y., Salamanova, M. Sh. and Gabashev, A. A. (2022) 'Ispytaniya gruntov pod zdaniya i sooruzheniya' [Testing of soils for buildings and structures]. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, № 1 (27), pp. 77-83.
2. Mushref, H. Sh., Kutiin, Y. A. and Telyashev, E. G. (2012) 'Neftianye dorognye bitумы, normativy, kachestvo, tehnologii, perspektivy' [Oil road bitumens. standards, quality, technology, and prospects] *Oil and Gas Business*, № 6, pp. 532-542.
3. Gokhman, L. M. (2018) 'Primenenie kachtstvennogo polymerno-bitumnogo vyagushhego dly usloviy Rossii' [Application of high-quality polymer-bitumen binder for Russian conditions] *Roads of Russia*. № 1, pp. 39-55.
4. Akhmadova, Kh. Kh., Khadisova, J.T. Makhmudova, L. Sh., Abdulmezhidova, Z. A. and Musayeva, M. A. (2019) 'Osnovniy sposoby modifikatsii bitumov' [The main ways of modifying bitumen with various additives]. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, № 3 (17), pp. 42-56.
5. Gokhman, L. M. (2017) *Dorogniy polymerasfaltobeton*. [Road polymer asphalt concrete] Econ-Inform. Moscow, 477 p.
6. Taramov, Yu. Kh., Tsamaeva, P. S. and Elmurzaev, A. A. (2022) 'Vliyanie sostava bituma na ekspluatatsionnye svoistva' [Influence of bitumen composition on operational properties] *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, № 1 (27), pp. 54-62.
7. Barkovsky, D. V. and Vysotskaya, M. A. (2016) *Tehnologiya ustroistva prodolnyh hvov sopragenia asfaltobetonnyh pokrutiy. Mirovoi oput* [Technology of longitudinal joints of asphalt-concrete pavement. World experience]. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, № 6, pp. 16-24.
8. Chalykh, A.E. Chalykh, A. E. and Shcherbina, A. A. (2016) 'Fundamentalnye problem adgezionnyh vzaimodeistviy v polumernykh sistemah'. [Fundamental Problems of Adhesive

- Interactions in Polymer Systems]. *Adhesive Materials: Proceedings of the Scientific and Technical Conference, VIAM, Moscow*, pp. 36-51
9. Deryagin, B. V., Krotova, N. A. and Smilga, V. P. (1973) Adhesia tverdyh tel [Adhesion of solids]. Izd. of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow, 280 p.
  10. Tutorsky, I. A., Potapov, E. E. and Schwarz, A. G. (1993) Himicheskaya modifikatsiya elastomerov [Chemical modification of elastomers]. Chemistry, Moscow, 304 p.
  11. Zolotarev, V. A. (2014) Dorogniy bitumnie viaguhie I asfaltobetonny [Road bituminous binders and asphaltic concrete], HNADU, Kharkov, 180 p.
  12. Galdina, V. D. (2009) Modifitsirovannyye bitумы [Modified bitumen], SibADI. Omsk, 228 p.
  13. Lushnikov, N. A., Lushnikov, P. A., Kovalev, D. I. and Kretov, V. A. (2022) 'Ob opredelenii nekotorykh geometricheskikh harakteristik kolei na proezhei chasti avtomobilnoy dorogy' [On determining some geometric characteristics of the rut on the roadway] *Roads and bridges*. №2 (46), pp. 95-99.
  14. Gokhman, L. M. (2004) Kompleksnyy organicheskye vagushie materialy na osnove bloksopolimerov tipa SBS. [Complex organic binders on the basis of SBS-type block polymers]. Econ-Inform. Moscow, 584 p.
  15. Nebratenko, D. Yu, Boksha, M. Yu. and Isakov A.M. (2022) 'Influence of SBS polymers of various structure on the properties of semi-blown bitumen binders'. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, pp. 5-17.
  16. Gorelysheva, L. A. (2019) 'Teoreticheskie aspekty sistematizatsii dobavok, ulushauchih svoystva bitumnogo vyagushego i asfaltobetonnoi smesi' [Theoretical aspects of systematization of additives improving properties of bituminous binder and asphalt concrete mixture]. *Roads and bridges*. №2 (42). pp. 203-236.
  17. Novikova, E. Kh. (2021) 'Rasvitie polymernuh resheniy dla dorognoi otrasly' [Development of polymer solutions for the road sector]. *Rubber and Rubber*, vol. 80, №5, pp. 272-275.
  18. Polonik, V. D., Kukleva, A. S., Avdeev, N. D., Shlyaptseva, M. D., Nikol'skii, V. G., Gordeeva, I. V. and Kotova, S. V. (2019) The Results of the Compromise Task Solution Directed for Development of Polymer-Modified Binder. *Key Engineering Materials*. Vol. 899, p. 67-72, 2021.
  19. Kashevskaya, E.V. Boksha M.Yu., Isakov A.M. and Nebratenko D.Yu. (2021) Závislosti vlivu struktury polymerů SBS na vlastnosti polofoukaných a oxidovaných asfaltových pojiv. Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek. *ASFALTOVÉ VOZOVKY*, České Budějovice, Czech Republic, pp. 2-3.
  20. Herman, E. A. (2018) Teoreticheskaya innovativnost [Theoretical innovativeness]. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. St. Petersburg: 148 p.
  21. Murtazaev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh., Koryanova, I. I. (2021) Mokryy sposob prigotovleniya stekla na kremnezemistykh dobavkakh. [Wet method of preparation of liquid glass on silica additives]. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, volume XV. №2 (24), p. 82-91.

## ТИПЫ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЕТОНОВ И ЕЕ УЧЕТ В ТЕХНОЛОГИИ И РАСЧЕТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© С. А. Стельмах

*ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

В исследовании были выявлены и проанализированы типы структурной неоднородности бетонов, а также оценка возможности ее применения в практическом строительстве, проектировании и производстве. Научная новизна исследования заключается в аналитическом обзоре существующих работ, включая собственные исследования, которые касаются развития существующих представлений о природе возникновения неоднородностей бетона, его физической сущности и технологического смысла. Сформулированы выводы о возможности учёта структурных неоднородностей бетона в технологии и расчётах строительных конструкций из железобетона. Выявлено, что перспективой обладают именно вариатропные конструкции с неоднородной структурой бетона по своему сечению. У таких конструкций имеется определенный запас и резерв прочности, которые можно эффективно использовать технологами, конструкторами и проектировщиками для создания новых типов эффективных строительных изделий и конструкций.

**Ключевые слова:** бетон, вибрирование, центрифугирование, фибра, структурная неоднородность, вариатропия.

**Введение.** В условиях повышающихся требований современного строительства к возводимым зданиям и сооружениям с учетом всех глобальных трендов и вызовов, с которыми сталкиваются современные проектировщики и строители, актуальным остаётся вопрос о качестве, безопасности и надежности строительных конструкций, зданий, сооружений, изделий и материалов. При сохранении этих параметров одновременно необходимо проводить научные изыскания в области повышения качества и улучшения эксплуатационных характеристик строительных материалов, изделий и конструкций ввиду того, что постепенно происходит исчерпание ресурсов, происходит существенное удорожание сырьевых материалов и оборудования. Всё это оставляет свой отпечаток и требует решения всех проблем с помощью нестандартных подходов.

Безусловно, на рынке строительных материалов, изделий и конструкций одно из лидирующих мест отводится изделиям и конструкциям из бетонов на основе цементных вяжущих. Эти материалы являются на протяжении

многих десятилетий основными, так как из них возводится абсолютное большинство зданий и сооружений, постоянно дорабатываются их составы, технологии, конструктивные решения бетонов и железобетонных элементов, и несмотря на многие попытки ухода от этого материала в сторону некоторых аналогов, данный материал все равно остаётся наиболее востребованным среди иных композиционных строительных материалов.

Следует отметить, что при всех преимуществах бетона имеются определённые недостатки, которые широко известны, однако они могут быть частично или полностью устранены за счёт инновационных решений в области материаловедения, контроля, исследований, конструкторских решений и технологических решений, в том числе и с помощью нестандартных подходов.

Сформулируем цель, задачи исследования, основную проблему, научную значимость и практическую новизну.

Целью исследования является выявление и анализ типов структурной неоднородности

бетонов, а также оценка возможности ее применения в практическом строительстве, проектировании и производстве.

Задачами исследования будут выступать обзор существующих исследований, включая собственные, касающиеся структурных неоднородностей бетонов различных типов, анализ возможности применения структурной неоднородности в прикладных отраслях, изучение природы возникновения таких неоднородностей, в частности разделение неоднородности на два типа: 1) естественная, возникающая сама по себе; 2) направленная, возникающая за счёт специальных рецептурно-технологических воздействий на бетоны при формовании.

В конечном итоге оценка полученных аналитических результатов с целью формулирования возможности учета неоднородностей бетона различного рода в технологии и расчёте строительных конструкций.

Научной новизной исследования будет являться аналитический обзор существующих работ, включая собственные исследования, которые касаются развития существующих представлений о природе возникновения неоднородностей бетона, его физической сущности и технологического смысла.

В качестве прикладной значимости работы будут сформулированы выводы о возможности учёта структурных неоднородностей бетона в технологии и расчётах строительных конструкций из железобетона.

**Основная часть.** Итак, в частности, известно, что бетон является композиционным материалом, характеризующимся неоднородной структурой. В свою очередь, неоднородность этой структуры во многом зависит от исходного компонентного состава, а также от технологии изготовления элементов, выполненных из бетона, кроме этого, существенную роль играет конструктивное решение. При этом следует учитывать фундаментальное условие взаимосвязи между составом, структурой и свойствами. В свою очередь, это фундаментальное взаимоотношение следует дополнить прикладными составляющими, такими как технология и расчёт.

Исходя из положений практически всех работ ученых, когда-либо занимавшихся во-

просами технологии бетонов во всех его проявлениях, отмечается высокая степень неоднородности данного композита. Известно [1], что с технологической точки зрения практически невозможно получить полностью однородную структуру. Технология бетона направлена лишь на минимизацию пустот, пор, непрогидратировавших зерен, а также на максимально рациональную структуру бетона, которая, в свою очередь, согласно фундаментальным законам строительного материаловедения в том числе, влияет на классическое соотношение: состав  $\rightarrow$  структура  $\rightarrow$  свойства. Таким образом, работами этих авторов также подтверждается прямое влияние структуры бетона на свойства затвердевшего композита.

Неоднородность бетона многими исследователями (в основном занимавшимися вопросами традиционного вибрированного бетона) в глобальном смысле рассматривается как отрицательное свойство, деструктивно влияющее на качество получаемых бетонных и железобетонных конструкций.

Так, в первую очередь в работах Ю. М. Баженова и О. А. Гершберга, а также во многих других работах описываются вибрированные бетоны [2]. Как правило, это вертикально формируемые элементы, в которых при вибрировании возникает так называемое явление сегрегации, то есть расслоение смеси по высоте элемента. Таким образом бетон, состоящий из тяжелой фракции крупного заполнителя, получает следующую картину структуры: крупные тяжелые частицы оседают в нижней части элемента, а легкие частицы (если это мелкие или пористые заполнители, либо иные легкие компоненты) всплывают и оказываются наверху такого элемента. Таким образом, при вертикальном вибрировании, будь это вибрирование на виброплощадке или погружение в смесь глубинных вибраторов, мы получаем расслоившийся элемент, который является неоднородным по высоте. Свойства его разнятся, и зачастую это приносит большое количество проблем для проектировщиков и строителей. Таким образом, основной задачей технологов, работающих с вибрированным бетоном, является рациональный подбор технологических и рецептурных факторов, в первую очередь ча-

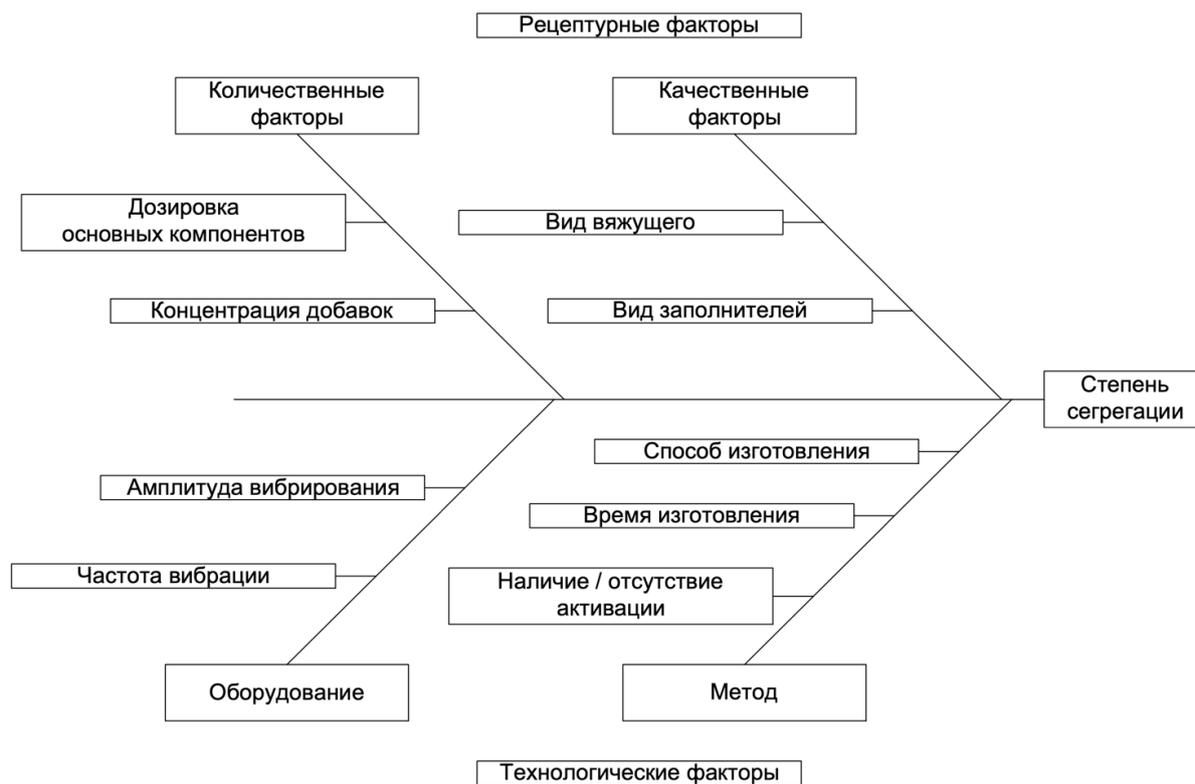


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень сегрегации

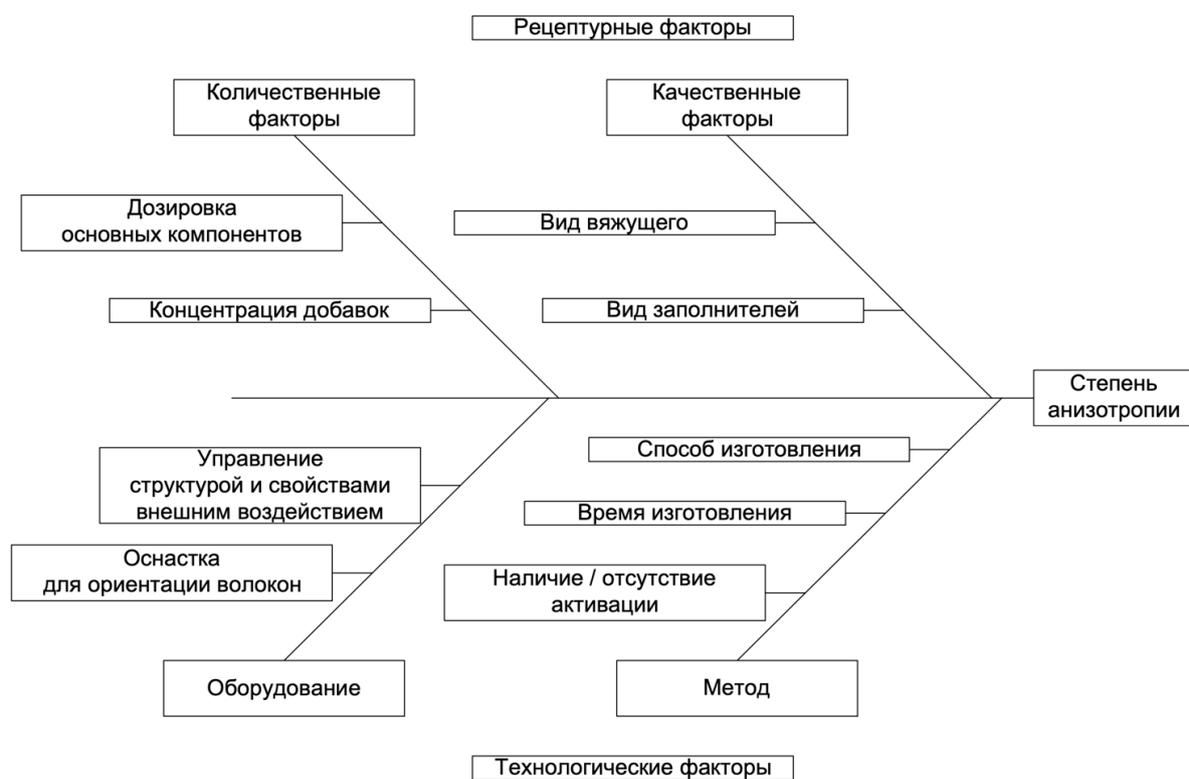


Рис. 2. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень анизотропии

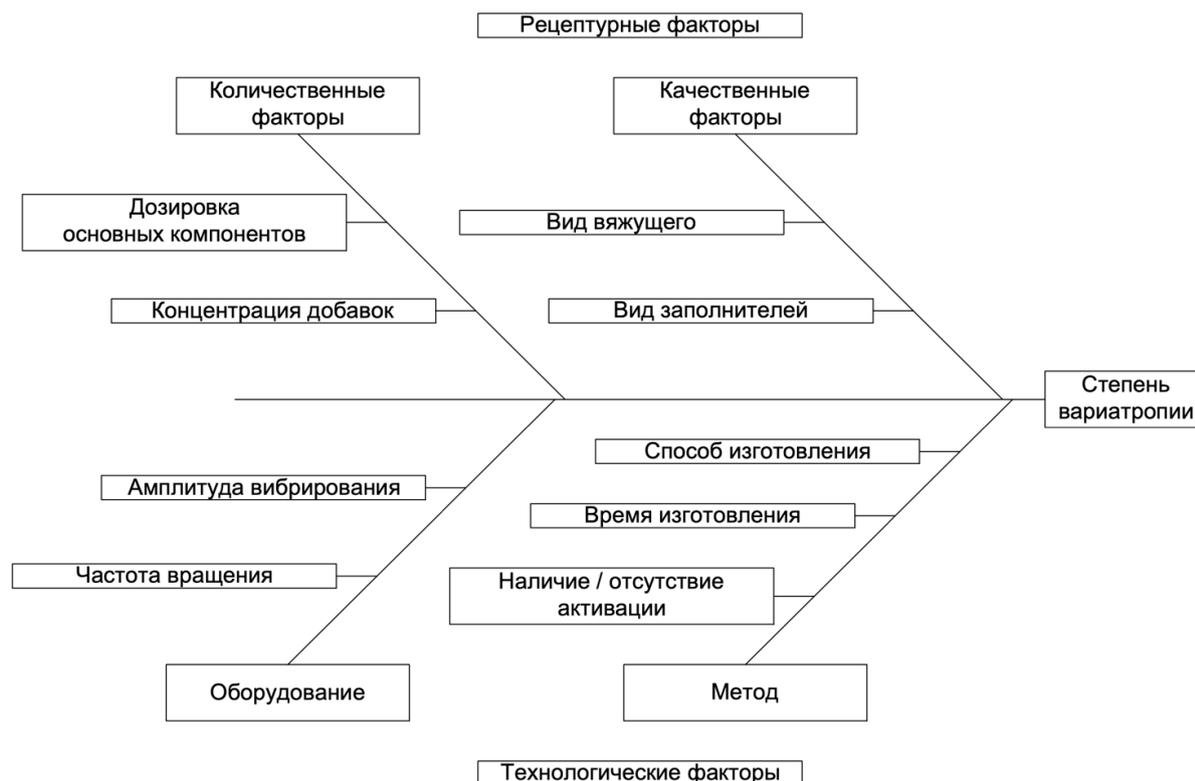


Рис. 3. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень вариатропии

стоты, амплитуды вибрации и иных показателей, которые более наглядно будут выглядеть в виде диаграмм Исикавы (рис. 1-3).

Рассмотрим другой вид бетона, принципиально отличающийся по технологии, структуре и, следовательно, по свойствам. Это так называемый вариатропный бетон, как правило, имеющий кольцевое сечение и производимый способами центробежного уплотнения бетонной смеси.

Если в случае с вибрационным уплотнением мы имеем в виду силу тяжести, которая помогает уплотнить бетон, то в случае с центробежным уплотнением мы сталкиваемся с центробежными силами, которые уплотняют бетон при раскрутке бетонной смеси в центрифугах.

Известны работы И. Н. Ахвердова, О. А. Гершберга, А. П. Кудзиса, Л. Р. Маиляна, Г. П. Пастушкова, Ю. Я. Штаермана и многих других выдающихся ученых, занимавшихся центрифугированными бетонами [3-7].

В случае центробежного уплотнения бетонной смеси вариатропная структура камня в классической теории рассматривалась как от-

рицательное свойство, и предпринимались попытки такую структуру, представляющую собой различие свойств не по высоте элемента, а по его сечению, свести к минимуму. Для этого предпринимались различные попытки рецептурных и технологических регулирований этой структуры. Известны работы, проводившиеся в Ростове-на-Дону, а также в Минске, Москве и Вильнюсе, направленные на технологию и расчет центрифугированных элементов. При этом вводились различные элементы в состав бетонной смеси для того, чтобы усреднить вариатропию и попытаться сделать ее близкой к нулю, нейтрализовав ее по всему сечению.

Однако впоследствии в ДГТУ (ранее РГСУ и РИСИ) в работах в рамках научной школы Л. Р. Маиляна, академика РААСН, были достигнуты результаты, подтверждающие положительный эффект от вариатропии при рациональном выборе рецептурно-технологических факторов и правильном учете вариатропных свойств бетона при расчете конструкций. Так, была доказана эффективность и выявлены скрытые резервы несущей способности вари-

атропных сечений у виброцентрифугированных бетонов [8]. Там вариатропия имела ярко выраженный характер, однако с помощью разработанных расчетных рекомендаций была получена рациональная методика расчета и проектирования таких конструкций и было вскрыто порядка 30% с прочности, находящейся в резервах. Тем самым, вариатропность при явных преимуществах таких пустотелых конструкций, легких по весу и маломатериалоемких по содержанию, приводила к достаточно существенному экономическому, технологическому и эксплуатационному эффекту.

Продолжая рассмотрение структур бетона, следует отметить анизотропные его свойства. Анизотропия – явление более характерное для других материалов, таких как, например, древесина. То есть это волокнистые материалы, которые в одном направлении имеют свойства, разительно отличающиеся от свойств в поперечном направлении.

Для бетона такое явление работы характерно для исследований, посвященных влиянию фибрового, то есть дисперсно-волоконистого армирования бетонов. Такие работы проводились для фибропенобетонов, то есть дисперсно-армированных ячеистых бетонов, например в работах Л.В. Моргун [9], в тяжелых и облегченных бетонах – в работах под руководством Л.Р. Маиляна [10, 11]. В работе Е.П. Матуса была рассмотрена возможность управления направленным фибровым армированием бетонов с помощью магнитного поля. Ориентация им фибр в пространстве в теле бетона задавала существенную анизотропию, однако такая анизотропия схожа с традиционным стержневым армированием и несет основные преимущества именно для изгибаемых элементов [12].

Таким образом, подытожив, можно выделить три различных типа структуры бетона (рис. 4):

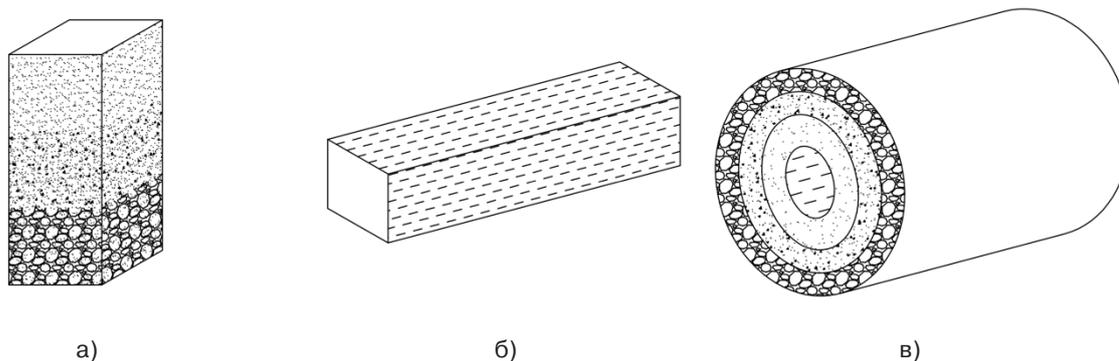


Рис. 4. Типы структурной неоднородности бетона: сегрегированная (а), анизотропная (б), вариатропная (в)

Таблица 1

Особенности структур бетона			
Тип структуры бетона	Характерная технология	Достоинства	Недостатки
Сегрегация	Вибрирование	Простота в изготовлении	Расслоение по высоте, массивность конструкций
Анизотропия	Дисперсное армирование изгибаемых элементов	Возможность управления свойствами бетона в нужном направлении	Применимость в основном для изгибаемых элементов
Вариатропия	Центробежное уплотнение	Легкий вес конструкций, малая материалоемкость	Сложность в изготовлении, невозможность монолитного изготовления элемента по месту строительства

- сегрегированная структура, то есть неоднородность по высоте элемента;
- анизотропия, где в одном направлении структура бетона имеет совершенно другие свойства, чем в другом;
- вариатропная структура, то есть неоднородность по сечению.

**Заключение.** Рассмотрим некоторые аспекты решений существующих проблем бетона и элементов из него, касающихся вопросов неоднородности, анизотропии, вариатропии и иных свойств и явлений, которые возникают в бетонах и на протяжении длительного периода являются проблемами проектировщиков, строителей, технологов и учёных, занимающихся решением указанных проблем.

Следует подходить к вопросам неоднородности бетона как к проблеме современного строительства, с точки зрения комплексного подхода: состав – структура – технология – расчёт – свойство. В этой связи интересным и перспективным выглядит использование неоднородности бетона в качестве преимущества, разумеется, при определённых допущениях и в определённых условиях.

Как известно, бетон характеризуется по своей структуре, в зависимости от различных методов, достаточно широкой классификацией. Так, по плотности бетон может быть в упрощённом виде и исходя из его физических свойств: легким, облегчённым и тяжёлым. Особыми случаями являются: ячеистые и мелкозернистые бетоны, а также сверхплотные бетоны. Все эти материалы, в зависимости от состава, отличаются также по степени своей неоднородности, за счёт управляемых и регулируемых, и неуправляемых и нерегулируемых факторов. Кроме этого, существуют конкретные технологии, которые, в свою очередь, влияют на возникновение неоднородности бетона либо по толщине сечения, либо по высоте сечения. Такими технологиями, в частности, может выступать наиболее распространённая технология – вибрирование. При такой технологии возникает явление сегрегации бетонной смеси – расслоение ее по высоте, а именно процесс, когда более тяжёлые частицы оседают в нижней части элемента, а в верхней части

элемента собираются более лёгкие частицы, и таким образом возникает разность свойств по высоте элемента.

Безусловно, очень направленным на возникновение разности свойств по сечению элемента являются различного рода технологии центробежного уплотнения, как правило, применяемые для изготовления железобетонных элементов кольцевого и круглого сечения. В этих сечениях возникает называемое нами явление вариатропии, т.е. это явление, которое характеризует разность и дифференциацию свойств по сечению элемента.

Кроме этого, для технологии вибрирования известны способы получения вариатропных или анизотропных дифференцированных свойств по сечению элемента, например, работа Е. Д. Гильмана. [13]. В этом случае, при электрической активации изгибаемого элемента прямоугольного сечения мы получаем дифференциацию свойств за счёт различий в зонах активации при твердении элемента. Так, в зоне анода мы получаем более плотный и прочный бетон по отношению к средней зоне и тем более по отношению к зоне катода. Такое свойство успешно было применено при расчёте, проектировании и эксплуатации изгибаемых железобетонных элементов с дифференциацией свойств по сечению. Тем самым мы сталкиваемся с различными технологическими приемами, которые осознанно или вынужденно ведут к возникновению дополнительной неоднородности и дифференциации характеристик бетонированных элементов.

При этом следует отметить, что сам по себе бетон в силу своей гетерогенной структуры является неоднородным композитным материалом, сочетающим в себе различные исходные компоненты: вяжущее, мелкий заполнитель, крупный заполнитель, наполнители и в зависимости от характеристик этих исходных компонентов существенно изменяется и его неоднородность, в т.ч. и анизотропия, вариатропия, сегрегация и иная дифференциация свойств элемента.

Так, одними из известных приемов управления структурой и свойствами бетона с вынужденной или управляемой дифференциацией является применение разноплотных и

разнохарактерных заполнителей. Например, применение комбинированных способов для крупного заполнителя, сочетание легких пористых с тяжелыми плотными заполнителями, использование комбинирования в мелком заполнителе различных пористых песков в сочетании с песками из плотных горных пород, применение различных наполнителей для достижения более плотной структуры, как в отдельных участках бетона, так и в элементе в целом, что также влияет, в том числе, и на дифференциацию характеристик элемента. Это могут быть различные наномодифицирующие добавки для получения так называемых Ultra-High Performance Concrete (UHPC), это могут быть какие-то элементы для получения более плотной упаковки частиц в ячеистых бетонах, это могут быть также и дополнительные технологические воздействия на бетоны и бетонные смеси для управления неоднородностью и дифференциацией свойств бетона.

Так, известны работы по применению электрических полей с малой энергоемкостью и высокой частотой для управления структурообразованием и свойствами ячеистых бетонов [14-16].

Кроме этого, известны работы по дополнительному вибрационному воздействию в режимах центробежного уплотнения [2-4, 8, 17-19].

Известны также способы вариативного виброуплотнения и особых режимов вибрационного воздействия на традиционные виды бетонов, например [7]. Тем самым мы получаем комплекс методов, который в общем виде можно охарактеризовать как: система методов управления структурообразованием и свойствами цементных бетонов, основанных на дополнительном рецептурном и технологическом воздействии на его дифференциацию характеристик в теле элемента.

Таким образом мы способствуем продвижению в направлении управления составом, структурой и свойствами строительных композитов за счёт технологии. В результате всего этого мы можем совершенствовать расчётные рекомендации, которые позволят высвободить скрытые резервы бетонов с управляемой и неуправляемой неоднородностью, и дифференциацией характеристик в теле элемента.

**Выводы.** Подводя итоги проведенного анализа, можно сделать следующие выводы.

Структурная неоднородность является неустраняемым спутником бетона и присутствует во всех типах бетонов, лишь в некоторых сводясь к минимуму.

При этом с точки зрения технологии можно лишь корректировать неоднородность, управлять ею, но всегда какая-то доля неоднородности остается.

С точки зрения же конструкторов и проектировщиков основной задачей является правильный учет этой неоднородности для того, чтобы получать наиболее эффективные конструкции и изделия.

Таким образом, из рассмотренных типов структурной неоднородности однозначно наибольшими недостатками обладает сегрегация. Такие бетоны являются наименее перспективными с точки зрения эксплуатации, и сегрегация – явление, однозначно подлежащее максимальному устранению с точки зрения технологий, и это явление отрицательное со всех точек зрения.

Что касается анизотропии, то это специфическое свойство ввиду заведомо иной структуры бетона в отличие от древесных волокнистых материалов, которым в наибольшей степени присуща анизотропия. Такая неоднородность может быть создана с помощью технологии, но такие анизотропные изделия ограничены в своей эксплуатации. Как правило – это изгибаемые элементы, которые имеют направленное армирование дисперсное, при этом следует отметить, что наиболее эффективно можно управлять армированием именно игольчатыми жесткими волокнами с помощью магнитных полей, а управлять мягкими волокнами можно лишь распушая их и загружая их в определенной последовательности в смеситель.

Наибольшей же, с нашей точки зрения, перспективой обладают именно вариатропные конструкции с неоднородной структурой бетона по своему сечению. Здесь вариатропия, в отличие от анизотропии, имеет замкнутый по сечению характер и способствует управлению свойствами конструкции, ввиду того, что работает внешний контур и отсутствуют разрывы именно в рабочем сечении. Таким образом, у

таких конструкций имеется определенный запас и резерв прочности, которые можно эффективно использовать технологами, конструкторами и проектировщиками для создания новых типов эффективных строительных изделий и конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Баженов Ю. М.* Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2007. 528 с.
2. *Гершберг О. А.* Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1965.
3. *Ахвердов И. Н.* Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
4. *Ахвердов И. Н.* Железобетонные напорные центрифугированные трубы. М.: Стройиздат, 1969. 164 с.
5. *Кудзис А. П.* Железобетонные и каменные конструкции (Ч. 1. Материалы, конструирование, теория и расчет). М.: Высшая школа, 1988. 286 с.
6. *Пастушков Г. П.* Многоэтажные каркасные здания с несущими железобетонными центрифугированными элементами: автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.23.01, 05.23.05. БГПА. Минск, 1994. 36 с.
7. *Штаерман Ю. А.* Центрифугированный бетон. Тифлис: Техника да Шрома, 1933. 106 с.
8. *Холодняк М. Г.* Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариатропии структуры: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.08. ДГТУ. Ростов-на-Дону, 2020. 181 с.
9. *Моргун Л. В.* Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавно твердения: автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.23.05. РГСУ. Ростов-на-Дону, 2005. 23 с.
10. *Булавин В. А.* Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. РГСУ. Ростов-на-Дону, 2004. 23 с.
11. *Айвазян Э. С.* Технологии создания и методы расчета фибробетонных и фиброжелезобетонных элементов с агрегированным распределением волокон: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01; 05.23.08. РГСУ. Ростов-на-Дону, 2013. 23 с.
12. *Матус Е. П.* Воздействие магнитного поля на структуру и свойства цементно-песчаного сталефибробетона: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. НГАСУ. Новосибирск, 2000. 20 с.
13. *Гильман Е. Д.* Улучшение свойств бетона и железобетона при воздействии постоянного тока малого напряжения: дис.... канд. техн. наук: 05.23.05. Рост. инж.-строит. ин-т. Ростов-на-Дону, 1979. 203 с.
14. *Стельмах С. А.* Влияние параметров малоэнергетических переменных электрических полей на свойства активированных теплоизоляционных пено- и фибропенобетонов: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.08. Рост. гос. строит. ун-т. Ростов-на-Дону, 2014. 180 с.
15. *Щербань Е. М.* Регулирование структурообразования и свойств теплоизоляционных пено- и фибропенобетонов, активированных малоэнергетическим переменным электрофизическим воздействием, технологическими и рецептурными факторами: дис.... канд. техн. наук: 05.23.08, 05.23.05. Рост. гос. строит. ун-т. Ростов-на-Дону, 2014. 216 с.
16. *Щербань Е. М.* О влиянии обработки пенобетонной смеси переменным электрическим полем на свойства пенобетона / *Ткаченко Г. А., Гольцов Ю. И., Стельмах С. А.* // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 170.
17. *Овсянкин В. И.* Железобетонные трубы для напорных водоводов (3-е издание). М.: Стройиздат, 1971. 320 с.
18. *Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Mintsayev M. Sh., Bisultanov R. G.* Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. P. 500-503.

19. Bataev D. K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M. Sh., Viskhanov S. S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклинкерных вяжущих щелочной активации) / Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. P. 457-460.

## TYPES OF STRUCTURAL HETEROGENEITY OF CONCRETE AND ITS ACCOUNTING IN THE TECHNOLOGY AND CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES

© S. A. Stelmakh

*DSTU, Rostov-on-Don, Russia*

The study identified and analyzed the types of structural heterogeneity of concrete, as well as the assessment of the possibility of its application in practical construction, design and production. The scientific novelty of the research consists in an analytical review of existing works, including our own research, which concerns the development of existing ideas about the nature of the occurrence of concrete inhomogeneities, its physical essence and technological meaning. Conclusions are formulated about the possibility of taking into account structural heterogeneities of concrete in the technology and calculations of reinforced concrete building structures. It is revealed that it is variatropic structures with an inhomogeneous structure of concrete in their cross-section that have the prospect. Such structures have a certain margin and reserve of strength, which can be effectively used by technologists, designers and designers to create new types of effective building products and structures.

**Keywords:** concrete, vibrating, centrifugation, fiber, structural heterogeneity, variatropy

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M. (2007) Tekhnologiya betona. [Concrete technology]. M.: Izd-vo ASV. P. 528.
2. Gershberg, O. A. (1965) Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii. [Technology of concrete and reinforced concrete products]. M.: Stroiizdat.
3. Akhverdov, I. N. (1981) Osnovy fiziki betona. [Fundamentals of concrete physics]. M.: Stroiizdat. P. 464.
4. Akhverdov, I. N. (1969) Zhelezobetonnye napornye tsentrifugirovannye truby. [Reinforced concrete pressure centrifuged pipes]. M.: Stroiizdat. P. 164.
5. Kudzis, A. P. (1988) Zhelezobetonnye i kamennye konstruksii (Ch. 1. Materialy, konstruirovaniye, teoriya i raschet). [Reinforced concrete and stone structures (Part 1. Materials, design, theory and calculation)]. M.: Vysshaya shkola. P. 286.
6. Pastushkov, G. P. (1994) Mnogoetazhnye karkasnye zdaniya s nesushchimi zhelezobetonnyimi tsentrifugirovannymi elementami: avtoref. dis.... dokt. tekhn. nauk: 05.23.01, 05.23.05. [Multi-storey frame buildings with load-bearing reinforced concrete centrifuged elements. Abstract of the Ph. D. thesis.]. BGPA, Minsk. P. 36.
7. Shtaerman, Yu. A. (1933) Tsentrifugirovannyi beton. [Centrifuged concrete]. Tiflis: Tekhnika da Shroma. P. 106.

8. Kholodnyak, M. G. (2020) Sovershenstvovanie rascheta i tekhnologii sozdaniya vibrotsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn s uchetom variatropii struktury: dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01, 05.23.08. [Improving the calculation and technology for creating vibrocentrifuged reinforced concrete columns, taking into account the variatropy of the structure. Abstract of the Ph. D. thesis.]. DGTU, Rostov-na-Donu. P. 181.
9. Morgun, L. V. (2005) Strukturnoobrazovanie i svoistva fibropenobetonov neavtoklavnogo tverdeniya: avtoref. dis.... dokt. tekhn. nauk: 05.23.05. [Structure formation and properties of fiber foam concretes of non-autoclave hardening. Abstract of the Ph. D. thesis.]. RGSU, Rostov-na-Donu. P. 23.
10. Bulavin, V. A. (2004) Gazobeton dlya monolitnykh ograzhdayushchikh konstruksii s variatropnoi porovoi strukturoi: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. [Aerated concrete for monolithic enclosing structures with a variotropic pore structure. Abstract of the Ph. D. thesis.]. RGSU, Rostov-na-Donu. P. 23.
11. Aivazyan, E. S. (2013) Tekhnologii sozdaniya i metody rascheta fibrobetonnykh i fibrozhelezobetonnykh elementov s agregirovannym raspredeleniem volokon: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01; 05.23.08. [Technologies for the creation and methods for calculating fiber-reinforced concrete and fiber-reinforced concrete elements with an aggregated distribution of fibers. Abstract of the Ph. D. thesis.]. RGSU, Rostov-na-Donu. P. 23.
12. Matus, E. P. (2000) Vozdeistvie magnitnogo polya na strukturu i svoistva tsementno-peschanogo stalefibrobetona: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. [Influence of a magnetic field on the structure and properties of cement-sand steel-fiber-reinforced concrete. Abstract of the Ph. D. thesis.]. NGASU, Novosibirsk. P. 20.
13. Gil'man, E. D. (1979) Uluchshenie svoistv betona i zhelezobetona pri vozdeistvii postoyannogo toka malogo napryazheniya: dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. [Improving the properties of concrete and reinforced concrete under the influence of direct current of low voltage. Abstract of the Ph. D. thesis.]. Rost. inzh.-stroit. in-t. Rostov-na-Donu. P. 203.
14. Stel'makh, S. A. (2014) Vliyanie parametrov maloenergoemkikh peremennykh elektricheskikh polei na svoistva aktivirovannykh teploizolyatsionnykh peno- i fibropenobetonov: dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01, 05.23.08. [Influence of the parameters of low-energy variable electric fields on the properties of activated heat-insulating foam and fiber foam concrete. Abstract of the Ph. D. thesis.]. Rost. gos. stroit. un-t. Rostov-na-Donu. P. 180.
15. Shcherban', E. M. (2014) Regulirovanie strukturnoobrazovaniya i svoistv teploizolyatsionnykh peno- i fibropenobetonov, aktivirovannykh maloenergoemkim peremennym elektrofizicheskimi vozdeistviem, tekhnologicheskimi i retsepturnymi faktorami: dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.08, 05.23.05. [Regulation of structure formation and properties of heat-insulating foam and fiber foam concretes activated by low-energy variable electrophysical impact, technological and recipe factors. Abstract of the Ph. D. thesis.]. Rost. gos. stroit. un-t. Rostov-na-Donu. P. 216.
16. Shcherban', E. M., Tkachenko, G. A., Gol'tsov, Yu. I. and Stel'makh, S. A. (2012) O vliyanii obrabotki penobetonnoi smesi peremennym elektricheskim polem na svoistva penobetona. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. [On the influence of the processing of foam concrete mixture by an alternating electric field on the properties of foam concrete. Modern problems of science and education]. №1. P. 170.
17. Ovsyankin, V. I. (1971) Zhelezobetonnye truby dlya napornykh vodovodov (3-e izdanie). [Reinforced concrete pipes for penstocks (3rd edition)]. M.: Stroizdat. P. 320.
18. Murtazayev, S- A. Yu., Salamanova, M. Sh., Mintshev, M. Sh. and Bisultanov, R. G. (2019) Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). Vol. 1. Pp. 500-503.
19. Bataev, D. K-S., S- A.Yu. Murtazayev, Salamanova, M. Sh. and Viskhanov, S. S. (2019) Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). Vol. 1. Pp. 457-460.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГЕОПОЛИМЕРНЫХ БЕТОНОВ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

© Е. М. Щербань

*ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

В статье проведен обзор существующих исследований, посвящённых вопросу технологии, рецептуры, составов, применения геополимерных бетонов в России и за рубежом. В результате проведённого обзора были сделаны аналитические выводы, определены научные и практические дефициты, которые касаются геополимерных бетонов, оценена применимость подходов, которые существуют в настоящее время с привязкой к современным условиям при производстве геополимерных бетонов, выявлены основные факторы, влияющие на свойства геополимерных бетонов и их эффективность, разработаны практические предложения для отрасли по результатам аналитического обзора. Таким образом, данное исследование направлено на решение ряда научно-технологических задач, которые относятся к вопросам импортозамещения, а также замены части сырьевых компонентов на более дешёвые компоненты с целью создания бесклинкерных вяжущих и геополимерных бетонов на их основе. Результаты данного аналитического исследования вносят существенный вклад в существующие представления, как теоретические, так и практические, о структуре и свойствах геополимерных бетонов.

**Ключевые слова:** бетон, геополимеры, бесклинкерные вяжущие, алюмосиликаты.

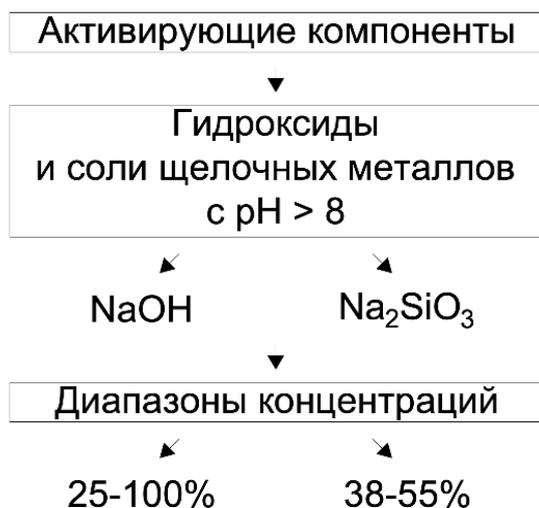
**Введение.** Целью проводимого исследования является обзор существующих исследований, посвящённых вопросу технологии, рецептуры, составов, применения геополимерных бетонов в России и за рубежом.

Задачами исследования являются аналитические выводы по итогу проведённого обзора, определение научных и практических дефицитов, которые касаются геополимерных бетонов, оценка применимости подходов, которые существуют в настоящее время с привязкой к современным условиям при производстве геополимерных бетонов, выявление основных факторов, влияющих на свойства геополимерных бетонов и их эффективность, разработка практических предложений для отрасли по результатам аналитического обзора.

Научной новизной исследования будет являться методологически заданное аналитическое исследование, результаты которого позволят развить существующие представления, как теоретические, так и практические, о структуре и свойствах геополимерных бетонов.

С точки зрения практической значимости исследование направлено на решение ряда научно-технологических задач, которые относятся к вопросам импортозамещения, а также замены части сырьевых компонентов на более дешёвые компоненты с целью создания бесклинкерных вяжущих и геополимерных бетонов на их основе [1].

Хорошо известно, что производство портландцемента требует значительного количества энергии и в то же время способствует выбросу в атмосферу большого количества общего диоксида углерода (около 7%) как прямо, так и косвенно [2]. Прямое выделение  $\text{CO}_2$  называется прокаливанием, а не прямое выделение  $\text{CO}_2$  происходит при сжигании ископаемого топлива для нагрева печи, а также при добыче и транспортировке цемента. Кроме того, на одну тонну цемента требуется около 2,8 тонн сырья; это ресурсоемкий процесс, при котором потребляется огромное количество природных ресурсов, таких как известняк и сланец, для производства цементных клинкеров [3-7]. В



**Рис. 1.** Виды активирующих компонентов

бетонной промышленности ежегодно требуется около одного триллиона литров воды для смешивания. После производства алюминия и стали цементный сектор является наиболее энергоемким строительным материалом в тех же направлениях. Каждая тонна цемента, произведенная на типичном цементном заводе, потребляет примерно 110-120 кВтч. Однако, с другой стороны, бетон на основе цемента по-прежнему является наиболее широко используемым материалом в строительной индустрии во всем мире. Поэтому для экономического развития крайне важно высокоэффективное использование возобновляемого и

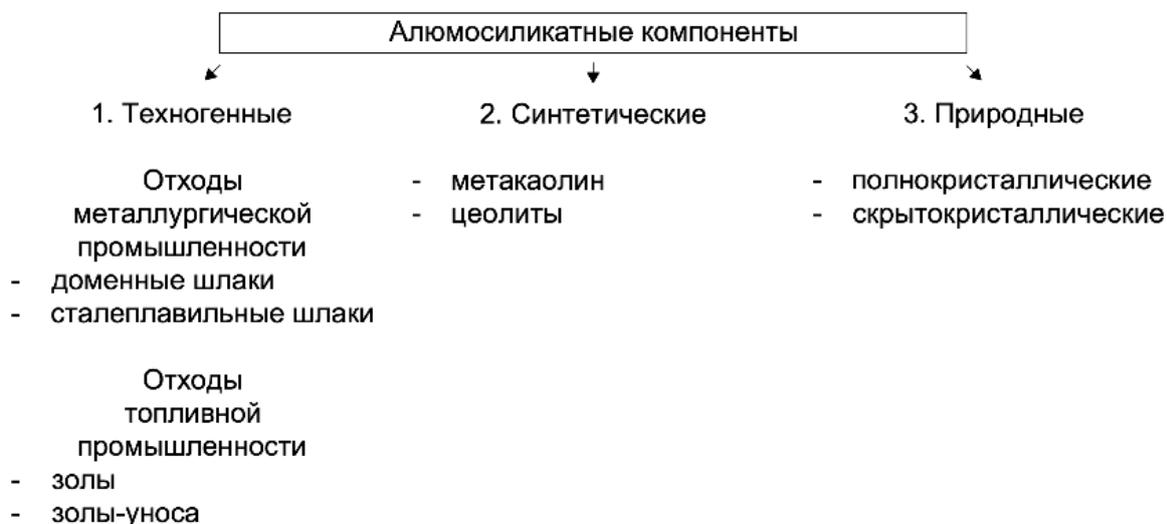
невозобновляемого сырья. Поскольку мир продолжает сталкиваться с серьезными экологическими проблемами, разработка уникального материала для замены портландцемента становится все более важной.

В настоящее время вяжущие вещества, активируемые щелочью, являются экологически чистой альтернативой обычному портландцементу.

Согласно Huseien et al. [3] геополимеры обладают внушительным перечнем достоинств, а именно высокими значениями прочностных характеристик, долговечностью и устойчивостью к повышенным температурам. Основными характеристиками геополимерного композита выступают низкая пористость, кислотостойкость и сульфатостойкость.

Основными определяющими факторами для производства геополимерных вяжущих являются объемы запасов алюмосиликатного сырья и его доступность для добычи, а также активность сырья, постоянство его химического состава и стабильность физико-механических характеристик геополимерных паст без изменения технологии производства геополимерного вяжущего [4, 5].

Основными сырьевыми составляющими геополимерного бетона являются алюмосиликатный компонент и активирующий компонент. На рисунке 1 представлены наиболее часто применяемые активирующие компоненты,



**Рис. 2.** Категории алюмосиликатных компонентов

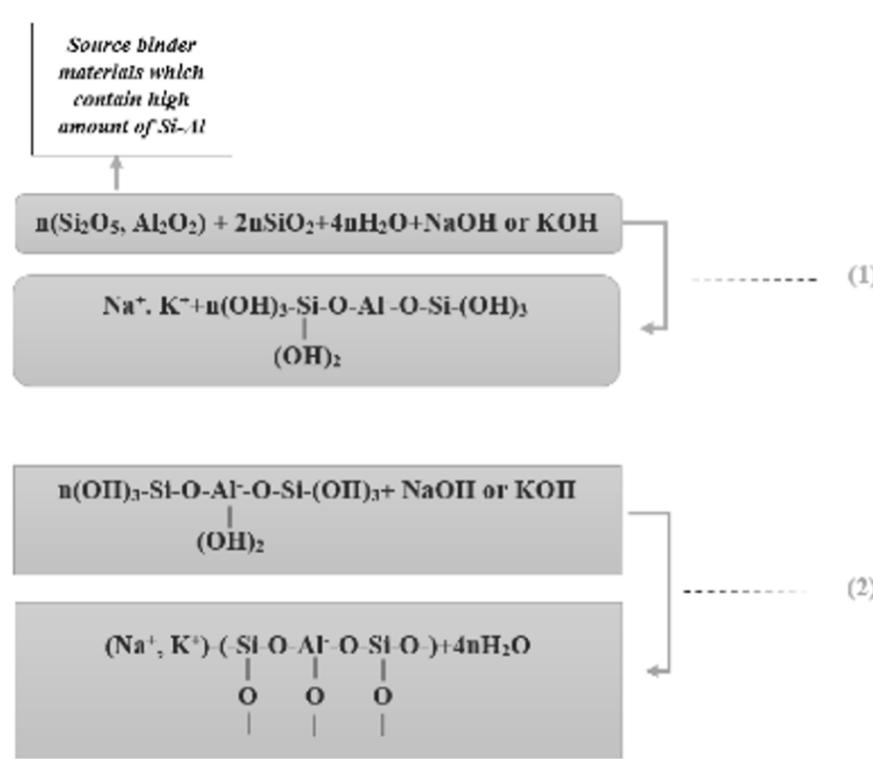


Рис. 3. Химические реакции в процессе геополимеризации

а на рисунке 2 приведена классификация алюмосиликатных компонентов.

Геополимеры представляют собой неорганические алюмосиликатные полимеры, полученные путем активации различных алюмосиликатных минералов различными щелочными растворами [3]. Геополимерные материалы имеют аморфную микроструктуру и химический состав, аналогичный природным цеолитовым материалам. Химическая реакция между щелочным раствором и исходным связующим материалом, содержащим алюмосиликат, называется процессом полимеризации; полимерная цепь и кольцевая структура, состоящая из связей Si-O-Al-O, образуется в процессе полимеризации, как показано на рисунке 3, схема адаптирована из [7-11] с эмпирической формулой  $\{Mn [- (\text{SiO}_2)_z\text{-AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}\}$ , где M – действие щелочи, n – процент полимеризации, w – содержание воды. Кроме того, цепи в алюмосиликате могут быть в виде поли (сиалата) с отношением Si к Al, равным 1,0 (цепь -Al-O-Si-), поли (сиалата-силокс) с

соотношением Si к Al, равному 2,0 (цепочка -Al-O-Si-Si-), и поли (сиалат-дисилокс) с отношением Si к Al, равному 3,0 (-Al-O-Si-Si-Si-цепь) [12-16].

Основной целью данного обзора является анализ влияния рецептурных и технологических факторов на физико-механические характеристики геополимерного композита.

**Основная часть.** Поиск литературы проведен с использованием различных поисковых систем нескольких баз данных, таких как Google Scholar, Scopus, Web of Science и ScienceDirect. В литературе имеется большой объем информации о геополимерных композитах с различными исходными вяжущими материалами [17-22].

Данные, полученные по результатам литературного обзора, сведены в таблицы, классифицированные по виду основного алюмосиликатного компонента.

**Результаты и обсуждения.** Результаты проведенного литературного обзора представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

## Геополимерные композиты на основе метакаолина – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	10	Получение всестороннего представления о влиянии различных параметров состава смеси на свойства свежей и отвержденной местной геopolyмерной на основе метакаолина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– удобоукладываемость улучшается с увеличением отношения силиката натрия к NaOH, также данный показатель улучшается с увеличением отношения щелочных твердых веществ к метакаолину и отношения воды к твердым веществам;</li> <li>– прочность на сжатие увеличивалась с увеличением отношения силиката натрия к NaOH и отношения щелочных твердых веществ к метакаолину до определенного предела, зависящего от молярных соотношений смеси;</li> <li>– прочность на сжатие улучшается с увеличением содержания заполнителя, наибольшая прочность на сжатие достигается при содержании заполнителя 73,8% и значительно снижается при ее повышении до 75,8% и 79,8%;</li> <li>– увеличение отношения воды к твердым веществам снижает прочность на сжатие;</li> <li>– плотность геopolyмерных смесей имеет тенденцию к снижению с возрастом отверждения в результате избыточного испарения воды</li> </ul>
2	11	Исследование поведения геopolyмерного бетона на основе метакаолина при температуре окружающей среды и повышенных температурах (200° С, 400° С, 600° С)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– установлено, что в условиях окружающей среды увеличение молярного соотношения <math>\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3</math> с 0,52 до 0,59 обеспечивает незначительное увеличение прочности на сжатие до 9%;</li> <li>– увеличение молярного отношения <math>\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3</math> до 0,7 приводит к падению прочности до 30%;</li> <li>– уменьшение молярного отношения <math>\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3</math> с 2,87 до 2,28 приводит к значительному снижению прочности до 55%;</li> <li>– остаточная прочность на сжатие геopolyмерных смесей варьировалась от 56% до 63%, от 38% до 51% и от 28% до 34% после воздействия 200°С, 400°С и 600°С соответственно</li> </ul>
3	12	Исследование влияния соотношения Si/Al на структуру, механические свойства и химическую стабильность геopolyмера на основе метакаолина с последующим добавлением плавного кварца	<ul style="list-style-type: none"> <li>– геopolyмеры с отношениями Si/Al<sub>2</sub> и 2,5 содержат меньше остаточного метакаолина, чем геopolyмеры с отношениями Si/Al<sub>3</sub>, 3,5 и 4;</li> <li>– плавный кварц с крупным размером частиц лишь частично прореагировал с щелочным раствором, проявляя химическую межфазную связь со связующей фазой;</li> <li>– геopolyмер с Si/Al<sub>4</sub> показал гораздо более высокие механические свойства, чем геopolyмер с Si/Al<sub>2</sub>, что было связано с увеличением связей Si-O-Si и остаточным кремнеземом в качестве армирующего материала;</li> <li>– геopolyмеры с <math>\text{Si}/\text{Al} \geq 3</math> показали худшую химическую стабильность на воздухе, чем геopolyмеры с <math>\text{Si}/\text{Al} \leq 2,5</math>, с наличием высолов на поверхности, что было связано с их более высоким остаточным свободным K +</li> </ul>
4	13	Исследование влияния температуры отверждения на формирование твердой структуры геopolyмера на основе метакаолина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– температура отверждения оказывает существенное влияние на схватывание и твердение геopolyмера на основе метакаолина;</li> <li>– высокие температуры отверждения 60 и 80°С увеличивают прочность на сжатие и изгиб в раннем возрасте;</li> <li>– 28-дневная прочность образцов, твердевших при повышенной температуре, была заметно ниже по сравнению с прочностью образцов, обработанных при комнатной или пониженной температуре;</li> <li>– влияние температуры зависит от времени отверждения, например, отверждение всего в течение 1 ч при повышенной температуре не вызвало заметных изменений в развитии прочности, но более длительная обработка приводила к значительному ускорению скорости реакции и повышению прочности в раннем возрасте</li> </ul>

5	14	Исследование характеристик сцепления стеклопластиковой и стальной арматуры, встроенной в геополимерный бетон на основе метаксаолина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– средняя нормализованная прочность сцепления геополимерных смесей в целом была ниже, чем у цементного бетона, на 11-27% и 21-40% для стальных и стеклопластиковых стержней соответственно;</li> <li>– включение стальной фибры в геополимерную смесь улучшило сцепление образцов со стальными и стеклопластиковыми стержнями на 7-45% и 33-114% соответственно</li> </ul>
6	15	Получение и изучение свойств активированного щелочью геополимера на основе метаксаолина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– установлено, что оптимальный геополимер получают из метаксаолина, гидроксида натрия, силиката натрия и воды при мольном соотношении <math>\text{SiO}_2: \text{Al}_2\text{O}_3: \text{Na}_2\text{O}: \text{NaOH}: 2\text{O} = 3,4: 1,1: 0,5: 1,0: 11,8</math>;</li> <li>– наилучшие условия отверждения составляли 60°C в течение 168 часов</li> </ul>
7	16	Исследование структуры геополимера на основе метаксаолинита, полученного при различных температурах отверждения	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отверждение при более высоких температурах 55, 65 и 80°C в течение одного часа положительно влияет на прочность при сжатии;</li> <li>– количество мезопор увеличивается с температурой отверждения, в то время как количество макропор уменьшается</li> </ul>

Таблица 2

Геополимерные композиты на основе золы – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	17	Исследования механических свойств и поведения сцепления при напряжении и скольжении геополимерного бетона с летучей золой	<ul style="list-style-type: none"> <li>– соотношение щелочного активатора и золы уноса весьма значительно влияет на прочность на сжатие, прочность на сжатие увеличилась с 21,9 МПа до 38,2 МПа за счет снижения данного соотношения с 0,4 до 0,30;</li> <li>– критическое напряжение сцепления и максимальная прочность сцепления геополимерного бетона зависят от прочности бетона на сжатие, так, при повышении прочности на сжатие возрастала как критическая, так и максимальная прочность связи за счет расширения межфазной переходной зоны между пастой с заполнителями</li> </ul>
2	18	Исследование механических характеристик и долговечности устойчивого геополимерного бетона с низким содержанием кальция и летучей золы	<ul style="list-style-type: none"> <li>– прочность на сжатие геополимерного бетона снижается при температуре отверждения 60°C;</li> <li>– промышленный песок не оказывает отрицательного влияния на характеристики геополимерного бетона;</li> <li>– потеря веса образцов в результате воздействия сульфатов и кислот минимальна;</li> <li>– у образцов, подвергшихся кислотному воздействию, наблюдалось незначительное повреждение поверхности до 2 мм;</li> <li>– у образцов, подвергшихся воздействию сульфатов, повреждение поверхности не наблюдалось</li> </ul>
3	19	Исследование влияние начального испарения с поверхности на характеристики геополимерной пасты на основе летучей золы при повышенных температурах	<ul style="list-style-type: none"> <li>– степень начального испарения с поверхности оказывает большое влияние на конечные характеристики образцов, где герметизация образцов в процессе отверждения и, следовательно, ограничение избыточного начального испарения с поверхности давали более стабильные результаты, а также намного более высокие прочностные показатели;</li> <li>– негерметичные образцы показали примерно на 25% меньшее значение средней начальной прочности и приблизительно на 35% и 25% меньшие показания средней остаточной прочности при 400°C и 800°C соответственно;</li> <li>– у негерметичных образцов наблюдалась сравнительно более высокая степень термического растрескивания и расщепления по сравнению с запаянными образцами</li> </ul>

4	20	Исследование механических свойств геополимерного бетона на основе золы-уноса с щелочными активаторами	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая молярность NaOH, используемого в качестве щелочного активатора, обеспечивает более высокую прочность на сжатие вместе со значительным влиянием на начальную прочность;</li> <li>– отношение предела прочности при раскалывании геополимерного бетона на основе золы-уноса со смесью 9 М NaOH и силиката натрия в массовом соотношении 50:50, отвержденного при 60°C в течение 24 ч, к его пределу прочности при раскалывании составляет примерно от 7,8 до 8,2%;</li> <li>– геополимерный бетон на основе летучей золы можно использовать для обычного бетона с портландцементом. Однако этот геополимерный бетон в основном больше подходит для сборных железобетонных изделий, поскольку прочность на сжатие геополимерного бетона может быть достигнута при температурах, превышающих 60°C</li> </ul>
5	21	Исследование влияния коротких волокон на механические свойства геополимерного раствора на основе золы-уноса, содержащего нефтезагрязненный песок	<ul style="list-style-type: none"> <li>– короткие волокна могут значительно улучшить прочность на сжатие геополимерного раствора, при этом наилучшее улучшение достигается при использовании прямых полипропиленовых волокон благодаря их хорошему сцеплению с раствором. Прочность на сжатие улучшилась на целых 39% по сравнению с раствором без волокон;</li> <li>– прочность на растяжение раствора с 6%-ным загрязнением сырой нефтью увеличилась при добавлении волокон за счет связи между волокном и раствором, что затем упрочняет раствор, повышая его устойчивость к восприятию нагрузок. Прямые полипропиленовые волокна улучшили прочность на разрыв на целых 74% по сравнению с образцом без волокна;</li> <li>– оптимальная дозировка 0,5% улучшала прочность геополимерного раствора на растяжение при сжатии и раскалывании на 65% и 89% соответственно по сравнению с образцом без волокон</li> </ul>
6	22	Исследование влияния характеристик летучей золы и компонентов щелочного активатора на прочность на сжатие геополимерного раствора на основе летучей золы	<ul style="list-style-type: none"> <li>– летучая зола с высоким содержанием аморфных компонентов (<math>\text{SiO}_2</math>, <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>, <math>\text{CaO}</math> и <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>) и низким медианным размером частиц (<math>&gt;17</math> мкм) требовала низкой дозы щелочного активатора в пересчете на <math>\text{Al}/\text{FA}</math>, <math>\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}</math> и концентрации NaOH для достижения оптимальной прочности на сжатие;</li> <li>– оптимальная прочность на сжатие, в которой использовалась летучая зола с низким содержанием аморфных компонентов и требуемым высоким средним размером частиц (<math>&lt;17</math> мкм), требовала более высокой дозы щелочного активатора;</li> <li>– распределение частиц по размерам влияет на степень развития прочности на сжатие летучей золы с аналогичным химическим составом</li> </ul>
7	23	Изучение влияния процедуры отверждения и дозировки активатора на набор прочности раствора на основе летучей золы	<ul style="list-style-type: none"> <li>– температура отверждения оказывает очень существенное влияние на прочность геополимеров на основе летучей золы. Образцы, отвержденные при 70°C, были значительно прочнее, чем образцы, отвержденные при 50°C. Было обнаружено, что время выдержки менее важно, и поэтому время выдержки в течение 1 часа перед отверждением в печи считалось достаточным;</li> <li>– дозировка активаторов очень важна не только для достижения требуемых свойств раннего старения, но и для влияния на прочность на сжатие. Оптимальное сочетание оптимального модуля щелочи и дозировки, т.е. дозировка щелочи 12,5% и модуль щелочности 1,25, дает прочность на сжатие более 70 МПа</li> </ul>

## Геополимерные композиты на основе шлака – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	24	Исследование влияния содержания молотого гранулированного доменного шлака (GGBFS), массового соотношения щелочного раствора и связующего (Al/Bi), массового отношения раствора силиката натрия к раствору гидроксида натрия (SS/SH) на прочностные характеристики геopolyмерного композита	<ul style="list-style-type: none"> <li>– с увеличением содержания GGBFS, в геopolyмерных пастах прочность на сжатие значительно возрастает, но время схватывания и удобоукладываемость резко сокращаются;</li> <li>– увеличение соотношения Al/Bi привело к снижению прочности на сжатие, увеличению обрабатываемости и времени схватывания;</li> <li>– при увеличении отношения SS/SH с 1,0 до 2 прочность на сжатие увеличилась. Однако когда отношение SS/SH увеличилось с 2,0 до 2,5, прочность на сжатие уменьшилась. Оптимальное соотношение SS/SH равнялось 2 для всех соотношений Al/Bi (0,4, 0,5, 0,6, 0,7). Кроме того, увеличение отношения SS/SH привело к уменьшению начального и конечного времени схватывания;</li> <li>– при увеличении соотношения Aw/Bi прочность на сжатие снижается, но увеличивается время начального и окончательного схватывания и удобоукладываемость;</li> <li>– оптимальная смесь имеет содержание GGBFS 40%, соотношение Al/Bi 0,5, соотношение SS/SH 2,0 и соотношение Aw/Bi 0,15</li> </ul>
2	25	Изучение влияния различных концентраций (молярности) гидроксида натрия (SH) на свойства самоуплотняющегося геopolyмерного бетона	<ul style="list-style-type: none"> <li>– изменения молярности NaOH отрицательно влияют на осадочную текучесть и значения J-кольца, самоуплотняющегося геopolyмерного бетона;</li> <li>– высокое содержание молярности снижает коэффициент проходимости геopolyмерного бетона</li> </ul>
4	26	Исследование влияния температуры отверждения на прочностные характеристики геopolyмерных систем на основе шлака	<ul style="list-style-type: none"> <li>– предварительное отверждение строительных растворов при комнатной температуре за 2 дня до отверждения при повышенной температуре не влияет на приобретаемую прочность, поскольку в это время происходит небольшая гидратация;</li> <li>– влажность в печи для отверждения заметно влияет на изменение механических свойств. Влажные условия более благоприятны, чем сухие, поскольку для гидратации требуется удержание влаги;</li> <li>– для геopolyмерных растворов, содержащих жидкое стекло и отвержденных при 80°C, КОН является более эффективным активатором, чем NaOH. Однако при комнатной температуре использование КОН давало более высокую прочность, чем использование равномолярного NaOH, только в первые несколько недель, после чего тенденция изменилась на противоположную;</li> <li>– отношение воды к шлаку оказывает большое влияние на прирост прочности как при повышенных температурах, так и при комнатной температуре</li> </ul>

5	27	Изучение влияния содержания щелочи и модулей активатора, а также времени отверждения на время схватывания, прочность, усадку при высыхании и проницаемость для хлоридов щелочно-активированного шлака	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличение содержания щелочи и модуля силиката натрия ускоряет как начальное, так и окончательное схватывание геополимерного раствора;</li> <li>– усадка при высыхании геополимерного раствора постепенно увеличивается с увеличением содержания и модуля щелочи</li> <li>– активатор с содержанием щелочи выше 4% способствует раннему набору прочности на изгиб, но снижает 28-дневную прочность на изгиб;</li> <li>– увеличение содержания щелочи, модулей и времени отверждения неуклонно улучшает прочность на сжатие</li> </ul>
6	28	Влияние активатора (жидкий силикат натрия (LSS), гидроксид натрия (SH) и карбонат натрия (SC)) на прочность и усадку при высыхании щелочно-активированного шлакового раствора	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сроки окончательного схватывания щелочно-активированной шлаковой пасты уменьшаются с увеличением концентрации натрия в активаторе. Кроме того, конечное время схватывания пасты из активированного шлака (жидкий силикат натрия) уменьшалось с увеличением отношения <math>\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}</math> (с 0,75 до 1,5);</li> <li>– раствор из активированного шлака LSS, SH и SC достиг максимальной прочности на сжатие 81, 29 и 36 МПа и максимальной прочности на растяжение при изгибе 6,8, 3,8 и 5,3 МПа через 28 дней;</li> <li>– увеличение концентрации натрия в активаторах приводит к увеличению прочности раствора на сжатие и изгиб;</li> <li>– усадка раствора из активированного шлака LSS и SH была в 3 и 6 раз больше, чем у раствора на основе портландцемента соответственно. Усадка раствора SC из активированного шлака была ниже или аналогична усадке раствора на основе портландцемента</li> </ul>
7	29	Исследование и понимание механизма усадки бетона на щелочно-активированном шлаке	<ul style="list-style-type: none"> <li>– бетон на щелочно-активированном шлаке имеет более высокую потерю массы, большую величину конечной усадки при высыхании и более медленную кинетику усадки по сравнению с бетоном на обычном портландцементе при аналогичной относительной влажности;</li> <li>– предельная усадка геополимерных смесей зависит не только от относительной влажности или потери массы, но также от скорости сушки и истории сушки;</li> <li>– растворенный силикат из активатора влияет на усадочную характеристику геополимерного раствора, изменяя структуру пор и механические свойства</li> </ul>

**Заключение.** По результатам проведенного литературного обзора основные факторы, влияющие на конечные физико-механические характеристики геополимерного композита [23-29], а также реологические характеристики геополимерных растворов можно наглядно представить в виде диаграммы Исикавы (см. рисунок 4).

**Выводы.** Основываясь на проведенном литературном обзоре ряда исследований, посвященных теме геополимерных композитов, можно сделать следующие выводы:

- геополимерные вяжущие с технологической точки зрения имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными клинкерными цементами, а именно более сокращенную технологическую линию по переработке исходного алюмосиликатного сырья, меньшая энергоемкость производства и как следствие более низкая себестоимость вяжущего;

- у них широкий ряд рецептурных и технологических возможностей. Варьируя соотношением сырьевых компонентов и изменяя условия синтеза геополимерных композитов, можно получить геополимерный композит, об-

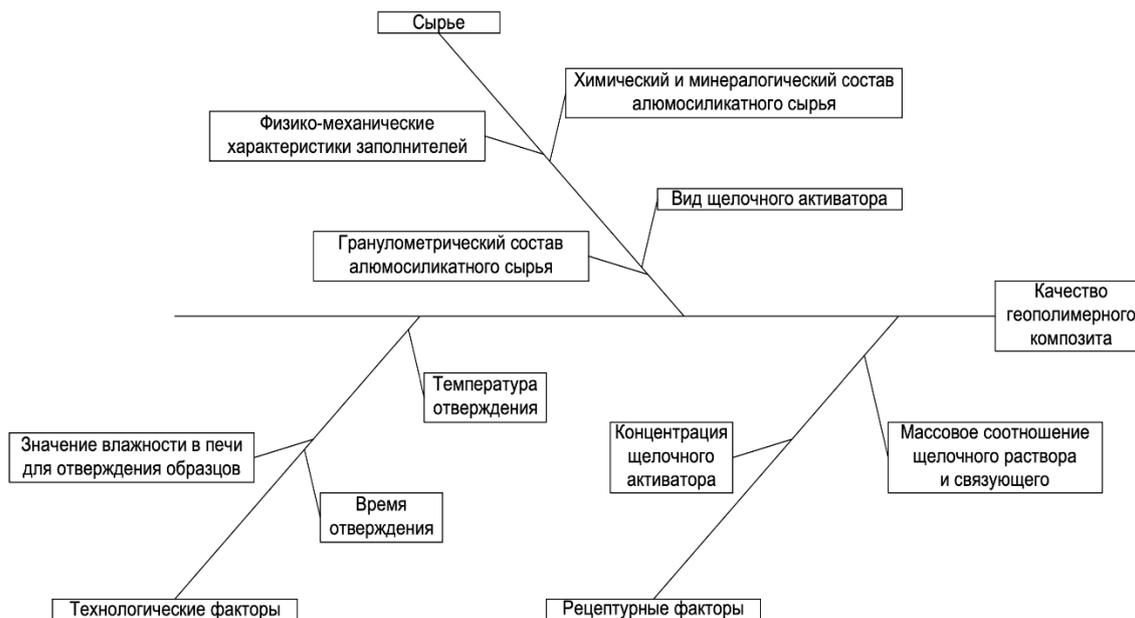


Рис. 4. Основные факторы, влияющие на качество геополимерного бетона

ладающий рядом специфических физических и механических характеристик, например, высокие показатели прочности при сжатии, стойкость к воздействию высоких температур, низкая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость, низкие усадочные деформации;

– геополимерные композиты можно применять при строительстве объектов общего назначения, при строительстве объектов специального назначения эксплуатируемых в условиях агрессивной окружающей среды или в условиях высоких температур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Salamanova M. Sh., Murtazayev S. A. Yu., Alaskhanov A. Kh., Saydumov M. S. Prospects for the use of waste cement industry in the production of clinker-free concrete // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 012012.
2. Salamanova M., Murtazaev S. A., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. С. 385-388.
3. Huseien G. F., Ismail M., Tahir M., Mirza J., Hussein A., Khalid N. H., Sarbini N. N. Effect of binder to fine aggregate content on performance of sustainable alkali activated mortars incorporating solid waste materials // Chem. Eng. Trans. 2018. №63. С. 667-672.
4. Муртазаев С.А. Ю., Саламанова М.Ш., Узаева А.А., Бисултанов Р.Г. Получение мелкозернистых бетонов на щелочных цементах из алюмосиликатных добавок // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №4 (26). С. 63-72.
5. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклинкерных композитов на вяжущем щелочной активации // Строительные материалы. 2022. № 1-2. С. 30-39.
6. Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer // Cement and Concrete Composites. 2010. Т. 32. №2. С. 142-147.
7. Abdulrahman Albidah, Mohammed Alghannam, Husain Abbas, Tarek Almusallam, Yousef Al-Salloum. Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Т. 10. С. 84-98.

8. *PeigangHe, Meirong Wang, ShuaiFu, DechangJia, ShuYan, JingkunYuan, Jiahuan Xu, Pengfei Wang, YuZhouab*. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer // *Ceramics International*. 2016. T. 42. №13. C. 14416-14422.
9. *Pavel Rovnanik*. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2010. T. 24. №7. C. 1176-1183.
10. *Abdulrahman Albidah, Ali Altheeb, Fahed Alrshoudi, Aref Abadel, Husain Abbas, Yousef Al-Salloum*. Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete // *Structures*. 2020. T. 27. C. 1582-1593.
11. *Liang Chen, Zaiqin Wang, Yuanyi Wang, Jing Feng*. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer // *Materials*. 2016. №9 (9). C. 767.
12. *Dongming Yan, Shikun Chen, Qiang Zeng, Shilang Xu, Hedong Li*. Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition // *Materials & Design*. 2016. T. 95. C. 306-318.
13. *Aredes F. G. M., Campos T. M. B., Machado J. P. B., Sakane K. K., Thim G. P., Brunelli D. D.* Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer // *Ceramics International*. 2015. T. 41. №6. C. 7302-7311.
14. *Hamdi Abdulrahman, Rahimah Muhamad, Phillip Visintin, Ahmad Azim Shukric*. Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. T. 327. C. 126909.
15. *Rajmohan B., R. Ramesh Nayaka, Rajesh Kumar K., Khaja Kaleemuddin* Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete // *materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022. T. 58. №4. C. 1337-1343.
16. *Thathsarani Kannangara, Maurice Guerrieri, Sam Fragomeni, Paul Joseph*. Effects of Initial Surface Evaporation on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Paste at Elevated Temperatures // *Apple Science*. 2022. №12 (1). C. 364.
17. *Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, Young Soo Chung*. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators // *Construction and Building Materials*. 2013. T. 47. C. 409-418.
18. *Rajab Abousnina, Haifa Ibrahim Alsalmi, Allan Manalo, Rochstad Lim Allister, Omar Alajarmeh, Wahid Ferdous, Khoulood Jlassi*. Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand // *Polymers*. 2021. №13 (17). C. 3008.
19. *Muhammad N.S. Hadi, Mustafa Al-Azzawi, Tao Yu*. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 175. C. 41-54.
20. *Marios Soutsos, Alan P. Boyle, Raffaele Vinai, Anastasis Hadjierakleous, Stephanie J. Barnett*. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers // *Construction and Building Materials*. 2016. T. 110. C. 355-368.
21. *Muhammad N. S. Hadi, Haiqiu Zhang, Shelley Parkinson*. Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability // *Journal of Building Engineering*. 2019. T. 23. C. 301-313.
22. *Khaleel H. Younis*. Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate // *materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022. T. 56. №4. C. 1733-1737.
23. *Ekin Altan, Sinan T. Erdoğan*. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures // *Cement and Concrete Composites*. 2012. T. 34. №2. C. 131-139.
24. *Shuai Fang, Eddie Siu Shu Lam, Bo Li, Bo Wu*. Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 249. C. 118799.
25. *Cengiz Duran Atiş, Cahit Bilim, Özlem Çelik, Okan Karahan*. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar // *Construction and Building Materials*. 2009. T. 23. №1. C. 548-555.
26. *Hailong Ye, Christopher Cartwright, Farshad Rajabipour, Aleksandra Radlińska*. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2017. T. 76. C. 13-24.

27. B. Singh, Ishwarya G., M. Gupta, S.K. Bhattacharyya. Geopolymer concrete: A review of some recent developments // *Construction and Building Materials*. 2015. T. 85. С. 78-90.
28. F. Pelisser, B.V. Silva, M.H. Menger, B.J. Frasson, T.A. Keller, A.J. Torii, R.H. Lopez. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete // *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2018. V. 11. N. 03. Pp. 535-543. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000300006>.
29. Mugahed Amran, Solomon Debbarma, Togay Ozbakkaloglu. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 270. С. 121857.

## THE CURRENT STATE OF THE ISSUE OF GEOPOLYMER CONCRETE IN RUSSIA AND ABROAD

© E. M. Shcherban

*DSTU, Rostov-on-Don, Russia*

The article provides an overview of existing studies on the technology, formulation, compositions, and application of geopolymer concrete in Russia and abroad. As a result of the review, analytical conclusions were made, scientific and practical deficiencies related to geopolymer concretes were identified, the applicability of approaches that currently exist with reference to modern conditions in the production of geopolymer concretes was assessed, the main factors affecting the properties of geopolymer concretes and their effectiveness were identified, practical proposals for the industry were developed based on the results of analytical review. Thus, this study is aimed at solving a number of scientific and technological problems that relate to import substitution, as well as replacing some of the raw materials with cheaper components in order to create linker-free binders and geopolymer concretes based on them. The results of this analytical study make a significant contribution to the existing ideas, both theoretical and practical, about the structure and properties of geopolymer concrete.

**Keywords:** concrete, geopolymers, linker-free binders, aluminosilicates

### REFERENCES

1. Salamanova M. Sh., Murtazayev S.A. Yu., Alaskhanov A. Kh. and Saydumov M. S. (2021) 'Prospects for the use of waste cement industry in the production of clinker-free concrete'. *Journal of Physics: Conference Series*. 012012.
2. Salamanova M., Murtazaev S.A., Alashanov A. and Ismailova Z. (2019) 'Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing'. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Pp. 385-388.
3. Huseien G. F., Ismail M., Tahir M., Mirza J., Hussein A., Khalid N. H. and Sarbini N. N. (2018) 'Effect of binder to fine aggregate content on performance of sustainable alkali activated mortars incorporating solid waste materials'. *Chem. Eng. Trans.* № 63. Pp. 667-672.
4. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M. Sh., Uzaeva A.A. and Bisultanov R. G. (2021) 'Poluchenie melkozernistykh betonov na shchelochnykh tsementakh iz alyumosilikatnykh dobavok' *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Obtaining fine-grained concrete on alkaline cements from aluminosilicate additives] Vol. 17. № 4 (26). Pp. 63-72.

5. Salamanova, M. Sh. and Nakhaev M. R. (2022) 'Opredelenie udel'noi svobodnoi poverkhnostnoi energii besklinsknykh kompozitov na vyazhushchem shchelochnoi aktivatsii' *Stroitel'nye materialy*. [Determination of the specific free surface energy of linker-free composites on an alkaline activation binder]. № 1-2. Pp. 30-39.
6. Xiaolu Guo, Huisheng Shi and Warren A. Dick (2010) 'Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer'. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. №2. Pp. 142-147.
7. Abdulrahman Albidah, Mohammed Alghannam, Husain Abbas, Tarek Almusallam and Yousef Al-Salloum (2021) 'Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters'. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 10. Pp. 84-98.
8. Peigang He, Meirong Wang, ShuaiFu, DechangJia, ShuYan, JingkunYuan, Jiahuan Xu, Pengfei Wang and YuZhouab (2016) 'Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer'. *Ceramics International*. Vol. 42. №13. Pp. 14416-14422.
9. Pavel Rovnaník (2010) 'Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer'. *Construction and Building Materials*. Vol. 24. №7. Pp. 1176-1183.
10. Abdulrahman Albidah, Ali Altheeb, Fahed Alrshoudi, Aref Abadel, Husain Abbas and Yousef Al-Salloum (2020) 'Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete'. *Structures*. Vol. 27. Pp. 1582-1593.
11. Liang Chen, Zaiqin Wang, Yuanyi Wang and Jing Feng (2016) 'Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer'. *Materials*. №9 (9). Pp. 767.
12. Dongming Yan, Shikun Chen, Qiang Zeng, Shilang Xu and Hedong Li (2016) 'Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition'. *Materials & Design*. Vol. 95. Pp. 306-318.
13. F. G. M. Aredes, T. M. B. Campos, J. P. B. Machado, K. K. Sakane, G. P. Thim and D. D. Brunelli. (2015) 'Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer'. *Ceramics International*. Vol. 41. №6. Pp. 7302-7311.
14. Hamdi Abdulrahman, Rahimah Muhamad, Phillip Visintin and Ahmad Azim Shukric. (2022) 'Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete'. *Construction and Building Materials*. Vol. 327. Pp. 126909.
15. Rajmohan B., R. Ramesh Nayaka, Rajesh Kumar K. and Khaja Kaleemuddin (2022) 'Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete'. *materialstoday: PROCEEDINGS*. Vol. 58. №4. Pp. 1337-1343.
16. Thathsarani Kannangara, Maurice Guerrieri, Sam Fragomeni and Paul Joseph (2022) 'Effects of Initial Surface Evaporation on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Paste at Elevated Temperatures'. *Apple Science*. №12 (1). Pp. 364.
17. Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh and Young Soo Chung (2013) 'The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators'. *Construction and Building Materials*. Vol. 47. Pp. 409-418.
18. Rajab Abousnina, Haifa Ibrahim Alsalmi, Allan Manalo, Rochstad Lim Allister, Omar Alajarmeh, Wahid Ferdous and Khoulood Jlassi (2021) 'Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand'. *Polymers*. №13 (17). Pp. 3008.
19. Muhammad N. S. Hadi, Mustafa Al-Azzawi and Tao Yu (2018) 'Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar'. *Construction and Building Materials*. Vol. 175. Pp. 41-54.
20. Marios Soutsos, Alan P. Boyle, Raffaele Vinai, Anastasis Hadjierakleous and Stephanie J. Barnett (2016) 'Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers'. *Construction and Building Materials*. Vol. 110. Pp. 355-368.
21. Muhammad N.S. Hadi, Haiqiu Zhang, Shelley Parkinson (2019) 'Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability'. *Journal of Building Engineering*. Vol. 23. Pp. 301-313.
22. Khaleel H. Younis (2022) 'Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate'. *materialstoday: PROCEEDINGS*. Vol. 56. №4. Pp. 1733-1737.

23. Ekin Altan and Sinan T. Erdoğan (2012) ‘Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures’. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 34. №2. Pp. 131-139.
24. Shuai Fang, Eddie Siu Shu Lam, Bo Li and Bo Wu (2020) ‘Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag’. *Construction and Building Materials*. Vol. 249. Pp. 118799.
25. Cengiz Duran Atiş, Cahit Bilim, Özlem Çelik and Okan Karahan (2009) ‘Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar’. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. №1. Pp. 548-555.
26. Hailong Ye, Christopher Cartwright, Farshad Rajabipour and Aleksandra Radlińska. (2017) ‘Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars’. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 76. Pp. 13-24.
27. B. Singh, Ishwarya G., M. Gupta and S.K. Bhattacharyya (2015) ‘Geopolymer concrete: A review of some recent developments’. *Construction and Building Materials*. Vol. 85. Pp. 78-90.
28. F. Pelisser, B.V. Silva, M.H. Menger, B.J. Frasson, T.A. Keller, A.J. Torii and R.H. Lopez (2018) ‘Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete’. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. Vol. 11. №03. Pp. 535-543.
29. Mugahed Amran, Solomon Debbarma and Togay Ozbakkaloglud (2021) ‘Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties’. *Construction and Building Materials*. Vol. 270. Pp. 121857.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.324

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.97.61.006

### ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХВАТА ПАКЕТОВ И ИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО АНАЛИЗА В СЕТЕВОМ АНАЛИЗАТОРЕ ДАННЫХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

© П. А. Кокшев<sup>1</sup>, Н. А. Галанина<sup>1</sup>, Д. Н. Суворов<sup>2</sup>, В. И. Марсов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЧГУ им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

<sup>2</sup>МАДИ, Москва, Россия

Рассматривается необходимость разработки специализированного анализатора данных для высокоавтоматизированных подстанций. Представлены особенности просмотра и первоначального анализа данных, передающихся по сети. Приведен детальный разбор сообщений, передающихся по протоколам GOOSE, MMS и SV согласно IEC 61850. Разработана программа для анализа данных цифровых подстанций с поддержкой идентификации несанкционированных устройств и контроля работы оборудования.

**Ключевые слова:** IEC61850, высокоавтоматизированные подстанции, IED, GOOSE, MMS, SV, сетевой анализатор.

**Введение.** Современный мир постепенно движется к полной цифровизации во всех сферах деятельности человека. Это открывает возможности для появления новых технологий, программных продуктов и аппаратно-технических комплексов. В частности, цифровизация в значительной мере влияет на энергетику и активно проявляет себя в самых отдаленных краях земли, вплоть до Арктики [7].

Когда речь заходит о цифровизации в энергетике, не обходится без упоминания относительно новой коммуникационной технологии IEC 61850. Еще недавно темы касательно стандарта IEC 61850 «Сети и системы связи на подстанциях» вызывали оживленные дискуссии. Кто-то видел будущее в этих технологиях, а кто-то считал их бесполезными. Сейчас же все больше специалистов видят перспективы цифровых решений, что приводит к увеличенному спросу на высокоавтоматизированные подстанции.

Появление новых технологий влечет за собой изменение ряда сопутствующих систем, в частности появление новых протоколов передачи данных, для которых начали формироваться новые требования к надежности и производительности системы. Таким образом, появилась необходимость в регистрации информационных потоков на цифровых подстанциях с целью мониторинга состояния оборудования, а также внедрения интеллектуальных сетей [6].

**Сетевой анализатор данных.** Как известно, за регистрацию информационных потоков в сети отвечает сетевой анализатор, работающий на уровне сетевого адаптера и позволяющий просматривать весь трафик сети. Анализ данных представляет собой процесс обработки всех данных, проходящих через определенный сетевой интерфейс. Применение сетевого анализатора открывает возможности мониторинга сети и анализа всех необходимых данных путем перехвата пакетов, проходящих через эту сеть [1].

В данном случае речь идет о данных, передающихся по сети высокоавтоматизированных (цифровых) подстанций согласно IEC 61850. К таким данным относятся сообщения, передающиеся по протоколам:

- GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event – IEC 61850-8-1) – протокол передачи данных о событиях на подстанции; данный протокол используется при передаче дискретных сигналов между устройствами, фактически позволяет заменить медные кабельные связи;

- MMS (Manufacturing Message Specification – IEC 61850-8-1) – протокол передачи данных реального времени и команд диспетчерского управления между сетевыми устройствами и/или программными приложениями, то есть благодаря данному протоколу происходит взаимодействие между SCADA-системой и устройствами РЗА;

- SV (Sampled Values – IEC 61850-9-2) – протокол передачи оцифрованных мгновенных значений от измерительных трансформаторов тока и напряжения. Данный протокол позволяет заменить цепи переменного тока, соединяющие устройства РЗА с трансформаторами тока и трансформаторами напряжения.

В рамках цифровых подстанций сеть разделяется на две шины:

- шина станции (по данной шине передаются сообщения по протоколу MMS и, опционально, по протоколу GOOSE);

- шина процесса (по данной шине передаются сообщения по протоколу SV и, опционально, по протоколу GOOSE).

По какой шине передавать GOOSE-сообщения, решается на этапе проектирования, в частности, это зависит от типа архитектуры, применение которой планируется в рамках реализации подстанции.

**Анализ данных.** Можно выделить несколько очевидных преимуществ, которые являются результатом анализа данных [2]:

- проверка правильности настройки конфигурации оборудования на подстанции, что дает возможность сразу после интеграции нового оборудования в систему и его запуска проверить соответствие публикуемых им сообщений с файлом конфигурации подстанции, в котором содержится информация обо всех устройствах, их сетевые настройки, а также данные об информационных потоках между этими устройствами;

- выявление некорректной работы сети и оборудования;

- обеспечение безопасности всей системы целиком и сети в частности.

**Реализация процесса перехвата и анализа данных.** Для перехвата пакетов исполь-

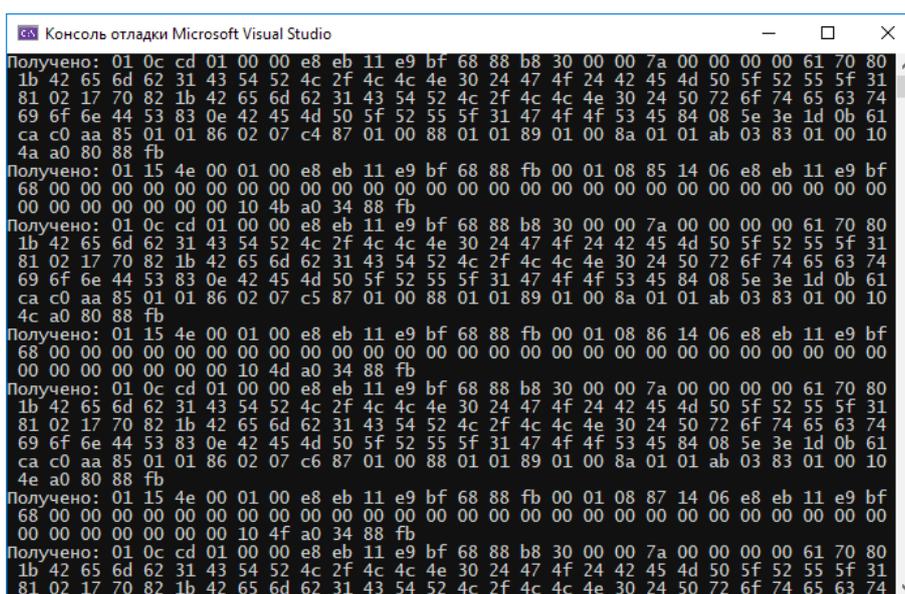


Рис. 1. Данные, полученные сетевой картой без предварительной обработки

зовалась библиотека для.NET, которая называется SharpPcar. Это обертка над библиотекой Pcar, которая позволяет создавать программы для анализа сетевых данных, поступающих на сетевую карту компьютера. Данная библиотека имеет открытый исходный код, ее преимуществом является то, что она является кроссплатформенной, а также имеет высокую производительность.

На рис. 1 представлены данные, полученные путем перехвата данных. Стоит отметить, что это просто поток информации, без какой либо обработки.

При разборе пакетов важно учесть тот факт, что MMS накладывается на уровень TCP, а GOOSE и SV – сразу на канальный уровень. На рис. 2 показано, как данные протоколы накладываются на сетевую модель OSI.

Следовательно, для GOOSE и SV мы должны разбирать все пакеты целиком, а для MMS, к которым относится ReportControl, только ту часть, которая начинается с ip-уровня.

Рассмотрим пример разбора пакета. Согласно рис. 1, GOOSE-сообщение состоит из следующих байт:

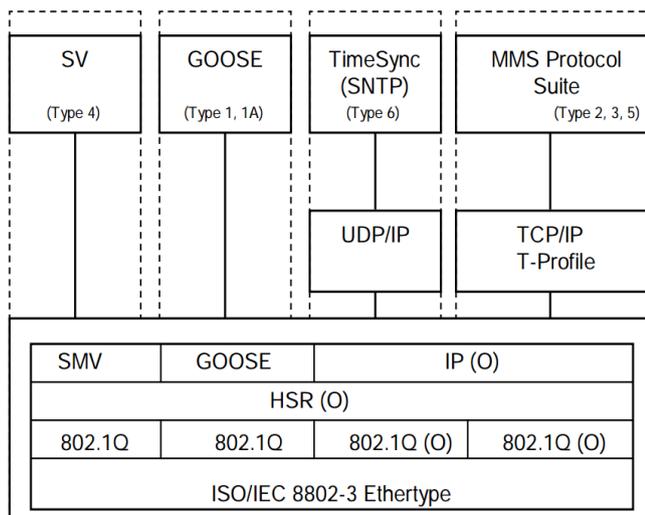


Рис. 2. Наложение протоколов на сетевую модель OSI

```
010c cd 010000 e8 eb 11 e9 bf 6888
b83000007a 000000006170801b 4265 6d
62314354524c 2f 4c 4c 4e 3024474f 244245
4d 505f 52555f 3181021770821b 4265
6d 62314354524c 2f 4c 4c 4e 302450726f
74656374696f 6e 4453830e 4245 4d 505f
52555f 31474f 4f 534584085e 3e 1d 0b 61 ca
c0 aa 850101860207 c4870100880101890100
8a 0101 ab 03830100104a a08088 fb.
```

В табл. 1 приведен пример разбора GOOSE-сообщения согласно полученным данным.

Таблица 1

Разбор GOOSE-сообщения

Наименование атрибута	Количество байт	Данные
MAC dst	6	010c cd 010000
MAC source	6	e8 eb 11 e9 bf 68
Type (IEC 61850/goose)	2	88 b8
APPID	2	3000
Length	2	007a
Reserved 1	2	0000
Reserved 2	2	0000
goosePdu		
Start	1	61
Length goosePdu	1	70
gocbRef		
Type	1	80
Length gocbref	1	1b
Body	Length gocbref	4265 6d 62314354524c 2f 4c 4c 4e 3024474f 244245 4d 505f 52555f 31

Timeallowedtolive		
Type	1	81
Length	1	02
Body	length	1770
DataSet		
Type	1	82
Length Dataset	1	1b
Body	Length Dataset	4265 6d 62314354524c 2f 4c 4c 4e 302450726f 74656374696f 6e 4453
Gold		
Type	1	83
Length GoId	1	0e
Body	Length GoID	4245 4d 505f 52555f 31474f 4f 5345
Time		
Type	1	84
Length Time	1	08
Body	Length Time	5e 3e 1d 0b 61 ca c0 aa
StNum		
Type	1	85
Length StNum	1	01
Body	Length StNum	01
SqNum		
Type	1	86
Length SqNum	1	02
Body	Length SqNum	07 c4
Test		
Type	1	87
Length Test	1	01
Body	Length Test	00
ConfRev		
Type	1	88
Length ConfRev	1	01
Body	Length ConfRev	01
NdsCom		
Type	1	89
Length NdsCom	1	01
Body	Length NdsCom	00
NumDatSetEntries		
Type	1	8a
Length NumDatSetEntries	1	01
Body	Length NumDatSetEntries	01
AllData		
Start	1	ab
Length AllData	1	03
Data		

Type	1	83
Length Data	1	01
Body	Length Data	00
PRP метка	6	104a a08088 fb

Можно заметить, что большая часть сообщения строится по шаблону, приведенному на рис. 3.

В пакетах содержится информация, позволяющая их однозначно идентифицировать. Например, касательно GOOSE-пакетов, к таковым относятся: gocbRef (ссылка на пакет), datSet (имя набора данных), goID (идентификатор пакета) и MAC-адреса источника и приемника сообщения и т. д.

Похожим образом разбираются остальные пакеты в сети, передающиеся по стандарту IEC 61850.

Каждый пакет в сети имеет свой тип – идентификатор и занимает два байта. Благодаря этому можно однозначно определить, сообщение какого типа нам предстоит обрабатывать. В табл. 2 представлены идентификаторы пакетов, которые передаются согласно интересующим нас протоколам.

Без сомнения, в сети подстанции могут быть и будут другие типы пакетов, но детально анализировать каждый из них нет необходимости. Однако в рамках информационной безопасности подстанции данные пакеты нам тоже

интересны. Эта тема будет затронута в следующей статье, а пока рассмотрим файл конфигурации подстанции.

**Необходимость файла конфигурации подстанции.** Файл конфигурации подстанции (SCL) содержит практически всю информацию о высокоавтоматизированной подстанции [4]. Следовательно, в нем также содержится информация обо всех информационных потоках, откуда мы можем получить необходимые нам сведения, а именно:

- сетевые параметры интеллектуального устройства (IED);
- параметры GSEControl;
- параметры SampledValueControl;
- параметры ReportControl;
- наборы данных и атрибуты, из которых они состоят.

В некоторых случаях SCL файлы также содержат в себе параметры клиентов, что дает возможность четко регламентировать количество всех возможных устройств в рамках подстанции.

Объектная модель SCL имеет три основные части:

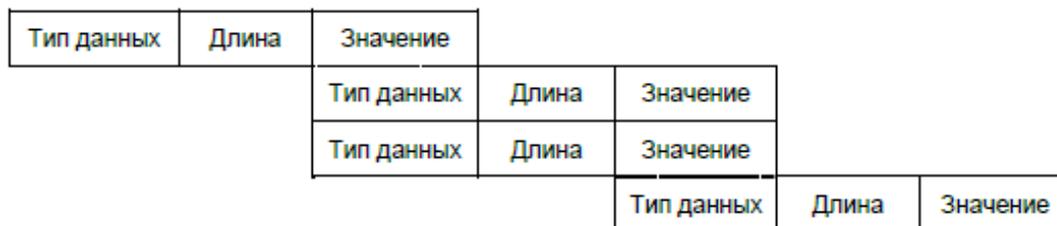


Рис. 3. Структура данных APDU

Таблица 2

Идентификаторы протоколов

Тип идентификатора	Протокол
0x88b8	GOOSE
0x88ba	Sampled Values
0x0800	IPv4 (MMS)

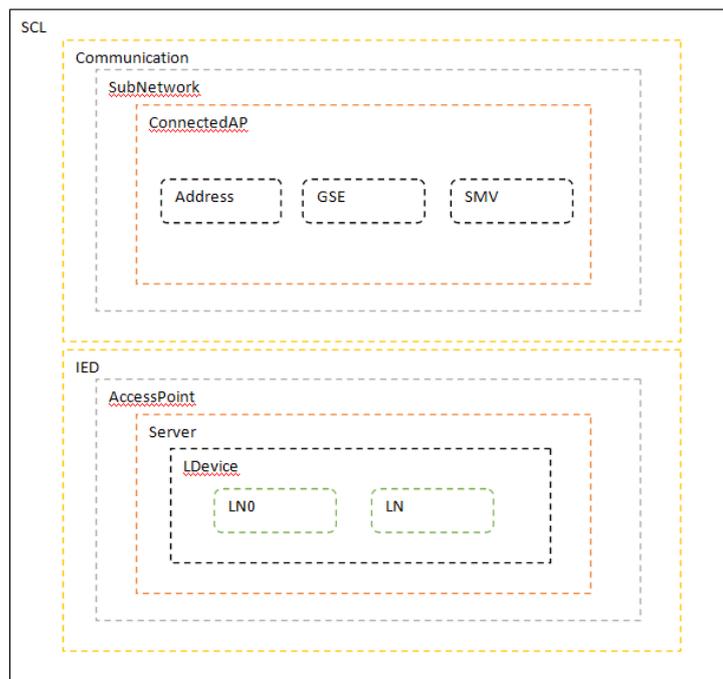


Рис. 4. Структура данных APDU

- Substation;
- IED;
- Communication.

На рис. 4 представлена структура SCL файла.

Блок Communication содержит типы объектов, относящиеся к связи, то есть подсети (SubNetwork) и точки доступа к среде передачи (ConnectedAP), а также данные о коммуникационных соединениях между различными интеллектуальными электронными устройствами (IED), описание которых содержится в файле конфигурации подстанции.

SubNetwork – определяет принадлежность устройства к определенной шине данных на подстанции.

ConnectedAP – узел, содержащий в себе сетевые параметры интеллектуального устройства, такие как: IP-адрес, маска подсети и шлюз. В этом же узле содержатся сетевые параметры GSE с SMV. В то же время все остальные параметры GSEControl, SampledValueControl и ReportControl описываются в блоке IED.

IED – устройство автоматизации подстанции, является описанием реального устройства подстанции. С другими IED-устройствами в составе системы автоматизации

оно обычно связывается через систему связи Communication.

Access point – коммуникационная точка доступа логического устройства (устройств) IED к подсети. Представляет собой ссылку на ConnectedAP, объявленную в узле Communication.

Server – связующий объект в IED-устройстве согласно серии стандартов МЭК 61850-7. Через систему связи и ее единственную точку доступа он обеспечивает доступ к данным LD и LN, содержащимся в устройстве.

LDevice – логическое устройство. Как видно на рис. 4, оно содержит в себе обязательный узел с именем LN0 и другой узел LN, имя которого может быть любым. Узлов LN в одном логическом устройстве может быть несколько.

LNO – обязательный узел, который есть в каждом логическом устройстве. Из интересующих нас данных он содержит ReportControl, GSEControl, SampledValueControl и DataSet.

Рассмотрим для примера GSEControl, который представляет собой блок GOOSE-сообщения, которое передается от одного устройства РЗА к другому и содержит следующие атрибуты:

- Name – имя goose-сообщения;

- Имя LD – имя логического устройства;
- Имя LN – имя логического узла;
- Имя DataSets – имя набора данных;
- ConfRev – версия конфигурации;
- appID – период сохранности, время отправки отчета;
- VLANID – идентификатор отчета;
- MAC-address;
- APPID;
- MaxTime / MinTime;
- данные.

SampledValueControl практически идентичен GSEControl, за исключением нескольких параметров. В свою очередь, ReportControl по структуре совершенно другой и содержит куда больше параметров, которые в том числе могут быть динамически настроены клиентом (например SCADA-системой).

Далее путем сравнения параметров полученных пакетов с данными из SCL-файла, можно проверять корректность настройки IED (соответствует ли его конфигурация конфигурации подстанции) и отлавливать неправиль-

ные пакеты, а также пакеты с некорректными значениями.

**Результаты.** Была успешно разработана программа, позволяющая значительно ускорить настройку и интеграцию новых цифровых устройств в высокоавтоматизированных подстанциях, а также просматривать состояние подключенного оборудования. С помощью разработанной программы можно идентифицировать неправильную работу устройств и возможные несанкционированные срабатывания. Программа была проверена путем проведения испытаний в лаборатории цифровой подстанции компании АО «ЧЭАЗ» и в ходе проведения пусконаладочных работ реальных подстанций.

Следующим шагом является интеграция в данную программу нейросетевых алгоритмов, с помощью которых в будущем появится возможность не только идентификации неправильных срабатываний, но и противодействия им, поддержания стабильности сети и эмуляции различных режимов работы [3,5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кокшев П. А.* Анализ готовых решений для сетевого анализатора данных высокоавтоматизированной подстанции / П. А. Кокшев, Н. А. Галанина // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 296-297.
2. *Кокшев П. А.* Особенности применения сетевого анализатора данных в цифровой подстанции и его возможности / П. А. Кокшев, Н. А. Галанина // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 93-96.
3. *Кокшев П. А.* Применение нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П. А. Кокшев // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 199-203.
4. *Кокшев П. А.* Применение стандарта МЭК 61850 для систем автоматизированного проектирования цифровых подстанций / П. А. Кокшев, Д. А. Удинов, Д. Г. Мухин // Сборник докладов научно-технической конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 178-183.
5. *Кокшев П. А.* Преимущества применения нейронной сети с архитектурой многослойного персептрона для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П. А. Кокшев, Н. А. Галанина // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 127-129.
6. *Амхаев Т. Ш.* Повышение качества электроэнергии внедрением интеллектуальных сетей / Т. Ш. Амхаев, М. В. Дебиев, У. И. Абдулхакимов, У. Р. Асхабов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XVIII. № 1 (27). 2022. С. 5-10.

7. Азиева Р. Х. Новые горизонты: цифровые технологии в Арктике / Азиева Р. Х., Абуев А. И., Якубов Т. В. // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сборник научных статей X Международной научной конференции. Казань: Изд-во: ООО «Конверт», 2021. С. 92-98.

## FEATURES OF PACKET CAPTURE AND THEIR INITIAL ANALYSIS IN THE NETWORK DATA ANALYZER OF THE DIGITAL SUBSTATION

© P. A. Kokshev<sup>1</sup>, N. A. Galanina<sup>1</sup>, D. N. Suvorov<sup>2</sup>, V. I. Marsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ChSU named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

<sup>2</sup>MRI, Moscow, Russia

The necessity of developing a specialized data analyzer for highly automated substations is considered. The features of viewing and initial analysis of data transmitted over the network are presented. A detailed analysis of messages transmitted via the GOOSE, MMS and SV protocols according to IEC 61850 is given. A program has been developed for analyzing data from digital substations with support for identifying unauthorized devices and monitoring equipment operation.

**Keywords:** IEC61850, highly automated substations, IED, GOOSE, MMS, SV, network analyzer.

### REFERENCES

1. Kokshev, P. A. and Galanina' N. A. (2022) Analiz gotovykh reshenii dlya setevogo analizatora dannykh vysokoavtomatizirovannoi podstantsii. Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy XIII-i Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Analysis of ready-made solutions for a network data analyzer of a highly automated substation]. *Information technologies in electrical engineering and electric power industry: materials of the XIII All-Russian Scientific and Technical conf.*. [CHGU Bulletin] pp. 296-297.
2. Kokshev, P. A. and Galanina, N. A. (2021) Osobennosti primeniya setevogo analizatora dannykh v tsifrovoi podstantsii i ego vozmozhnosti. Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Features of using a network data analyzer in a digital substation and its capabilities]. *Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency: materials of the V International Scientific and Technical. conf.*. [CHGU Bulletin. Technical Sciences] pp. 93-96.
3. Kokshev, P. A. (2021) Primenenie neirosetyvykh algoritmov obnaruzheniya vtorzhenii dlya setevogo analizatora dannykh tsifrovoi podstantsii. Sovremennye tendentsii razvitiya tsifrovyykh sistem releinoi zashchity i avtomatiki: materialy nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov foruma «RELAVEKSPO-2021». [Application of neural network intrusion detection algorithms for a network data analyzer of a digital substation]. *Modern trends in the development of digital relay protection and automation systems: materials of scientific and technical conf. of young specialists of the forum "RELAVEXPO-2021"*. [CHGU Bulletin. Technical Sciences] pp. 199-203.
4. Kokshev, P. A., Udikov, D. A. and Mukhin, D. G. (2019) Primenenie standarta MEK 61850 dlya sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya tsifrovyykh podstantsii. Sbornik dokladov nauchno-

- tekhnikeskoi konferentsii. [Application of the IEC 61850 standard for computer-aided design systems of digital substations'. *Collection of reports of the scientific and technical conference*]. [CHGU Bulletin] pp. 178-183.
5. Kokshev, P. A. and Galanina, N. A. (2021) Preimushchestva primeneniya neironnoi seti s arkhitekturoi mnogosloinogo perseptrona dlya setevogo analizatora dannykh tsifrovoi podstantsii. Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Advantages of using a neural network with a multilayer perceptron architecture for a network data analyzer of a digital substation'. *Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems: materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical conf.*]. [CHGU Bulletin] pp. 127-129.
  6. Amkhaev, T. S., Debiev, M. V., Abdulkhakimov, U. I. and Askhabov, U. R. (2022) Povyshenie kachestva elektroenergii vnedreniem intellektual'nykh setei. [Improving the quality of electricity by the introduction of intelligent networks]. *Vestnik GGNTU. Technical Sciences*. [Vestnik GGNTU. Technical Sciences. Volume XVIII]. № 1 (27), pp. 5-10.
  7. Azieva, R. H., Abuev, A. I. and Yakubov, T. V. (2021) Novye gorizonty: tsifrovye tekhnologii v Arktike. Prioritetnye napravleniya innovatsionnoi deyatelnosti v promyshlennosti. Sbornik nauchnykh statei X mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. [New horizons: digital technologies in the Arctic'. *Priority directions of innovation activity in industry. Collection of scientific articles of the X International Scientific Conference.*]. [Publishing House: LLC "Konvert"], pp. 92-98.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И РАСШИРЕННЫЙ ЭТАП ЭКСПЛУАТАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

© Д. И. Приходько<sup>1</sup>, А. В. Мокряков<sup>2</sup>, В. В. Горшков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ МАИ, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова»

В статье разобрано понятие технической эксплуатации информационных систем с точки зрения теории жизненного цикла применительно к информационным системам. Предлагается авторский подход к понятию технической эксплуатации применительно к современным информационным системам. Была предложена классификация технической эксплуатации по количеству изделий, по удаленности и по принадлежности к эксперименту. С учетом предложенного наполнения понятия современной технической эксплуатации были предложены расширенные представления блок-схем этапов эксплуатации применительно к основным типам жизненных циклов: каскадной и версионной модели жизненного цикла. Были обозначены особенности жизненного цикла информационных систем, находящихся в стадии тестирования, и были описаны особенности их жизненных циклов с точки зрения этапа разработки информационных систем. Было показано, что этап эксплуатации таких информационных систем имеет свои специфические особенности, которые могут быть использованы в процессе разработки информационных систем, предназначенных для работы в экстремальных условиях.

**Ключевые слова:** жизненный цикл информационных систем, техническая эксплуатация, эксплуатация как элемент жизненного цикла информационных систем.

Понятие эксплуатации [1] пришло из экономики с трудами Карла Маркса, однако в рамках статьи будут рассмотрены вопросы технической эксплуатации как зачатки отдельного нового направления. Причем современное понятие эксплуатации разрослось достаточно широко для того, чтобы его можно было рассмотреть в рамках простой последовательности операции, сегодня в зависимости от компании и производственных контрактов с подрядчиками на обслуживание вычислительной системы. Цепочка процесса технического обслуживания в зависимости от критериев может быть крайне простая – например, обслуживание компонентов ОС на персональном компьютере [2], а может включать в себя несколько сменяющих друг друга и даже включать перемещение оборудования между различными корпорациями.

Современное понятие эксплуатации с точки зрения теории жизненного цикла можно выразить как этап жизненного цикла, при котором вычислительная система находится в состоянии используемой, и для сохранения технических характеристик проводится ТО, состоящее в простейшем случае из обработки устранимых отказов, сбоев, проведении профилактики. Современное представление технической эксплуатации информационных систем можно классифицировать различными способами. Один из возможных вариантов классификации выглядит таким образом:

1. Эксплуатация с точки зрения теории жизненного цикла по числу рассматриваемых объектов:

а. Эксплуатация модельного ряда или марки. Анализируются технические особенности нескольких изделий, обладающих ана-

логичными характеристиками (однотипное оборудование одного производителя) при взаимодействии с окружающей средой. На основе полученных результатов создается методика эксплуатации этого набора оборудования.

б. Эксплуатация единичного изделия или экземпляра. Производится технический анализ использования оборудования применительно к условиям окружающей среды. При техническом анализе учитываются характеристики модельного ряда изготовителя. На выходе создаются нормативные документы правил использования и технического обслуживания изделия.

2. Эксплуатация по расположению от технического специалиста или пользователя:

а. Удаленная эксплуатация. Подразумевается тот факт, что пользователь или технический специалист, обслуживающий оборудование, не имеет физического доступа к оборудованию, а использует в своей работе специальное программное обеспечение.

б. Непосредственная эксплуатация. Подразумевается тот факт, что пользователь или технический специалист, обслуживающий оборудование, имеет физический доступ к оборудованию, и помимо программных средств может осуществлять аппаратные манипуляции с вверенным ему оборудованием.

3. Особая классификация эксплуатации в контексте разработки вычислительных систем:

а. Экспериментальная эксплуатация. Является служебным типом эксплуатации. Она предназначена для технического анализа возможных реализаций информационной системы или оборудования.

б. Базовая эксплуатация. Подразумевает техническую работу с итоговым оборудованием или информационной системой.

После описания классификации не менее актуальным вопросом становится анализ концептуального наполнения понятия эксплуатации:

1. Обслуживание ИС:

а. Обновление компонентов системы. Устаревший компонент удаляется и вместо него устанавливается новый. Старый компонент ожидает следующая участь: или попадает на хранение, или утилизируется.

б. Стандартное обслуживание. Это основной тип обслуживания. В некоторых случаях самостоятельно выполняется пользователем.

2. Пользовательская работа информационной системы.

Поэтому эксплуатацию можно в упрощенном варианте разделить на 2 процесса: процесс обслуживания и процесс использования. Поэтому основная проблема современной теории жизненного цикла заключается в том, что этапу эксплуатации уделено мало внимания. В большинстве случаев понятие рассматривается в контексте одной из своих характеристик – надежности.

Поэтому целью статьи является рассмотрение на основе приведенной классификации модификации классических моделей жизненного цикла в контексте этапа эксплуатации. Учитывая вышеизложенную классификацию понятия эксплуатации, теперь будут рассмотрены эксплуатационные циклы современных информационных систем в рамках теории жизненного цикла информационных систем. Прежде чем перейти к непосредственному рассмотрению существующих моделей жизненных циклов информационных систем с детализированным этапом эксплуатации, необходимо отметить, что в рамках статьи для моделей жизненного цикла будет детально прорисовываться только структура этапа жизненного цикла.

Техническая эксплуатация экземпляра из модельного ряда. Модель жизненного цикла единичного изделия (экземпляра модельного ряда) состоит из нескольких этапов:

1. Приобретение экземпляра под нужды компании.

2. Включение приобретенного компонента в систему.

3. Эксплуатация информационной системы и компонента.

4. Замена устаревшего компонента.

При этом следует отметить, что замена устаревшего компонента (вывод компонента из активной стадии эксплуатации) может быть выполнена несколькими путями:

1. *Стадия хранения на складе.* Используется как запчасти или как аварийная замена на случай выхода из строя новой версии экземпляра.

2. *Стадия списания.* Экземпляр может оставаться для служебных нужд – в качестве вспомогательного решения, однако для основной части не используется.

3. *Стадия утилизации.* Экземпляр выкидывается или любым другим способом физически выводится из компании.

Также важным является переход из третьего к четвёртому этапу. Так, например, желательно продлить работоспособность устройства в частично рабочем состоянии, если невозможно или нецелесообразно его заменить. Для микропроцессора в общем случае любое повреждение, скорее всего, приведёт к полной остановке всей системы, однако используя технологию отключения неработающих блоков можно добиться продолжения эксплуатации устройства [7, 8].

Важно отметить, что известные модели каскадных жизненных циклов вполне корректно отображают процессы жизненного цикла современных информационных систем [9], кроме этапа эксплуатации, который в последние годы претерпел серьезное изменение в связи с изменением социальной жизни. Процесс эксплуатации, проходящий по каскадному жизненному циклу, изображен на рисунке 1.

На рисунке 1 видно, что эксплуатация по каскадному стилю представляет собой подобие цикла по условиям. Причем условия выхода из цикла эксплуатации конкретной информационной системы выглядят таким образом:

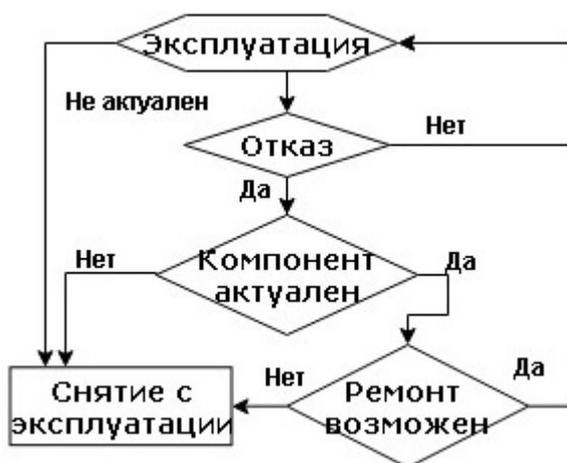


Рис. 1. Детализированный этап эксплуатации каскадной модели жизненного цикла

1. Технологическое устаревание компонента.

2. Потеря работоспособности вследствие неустраняемого отказа (либо технического, либо по причине экономической нецелесообразности – ремонт стоит дороже с точки зрения процедуры покупки нового изделия).

На рисунке 1. Блок снятия с эксплуатации включает в себя сразу несколько вариантов действий:

1. Компонент полностью выведен из системы и перешел в стадию хранения, т.е. используется как дублер или набор запчастей.

2. Компонент отправлен в утилизацию.

3. Компонент разобран на запчасти.

В приведенных выше ситуациях процесс эксплуатации конкретной информационной системы прекращается. Теперь рассмотрим процесс эксплуатации модельного ряда.

Эксплуатация модельного ряда. Классическая модель жизненного цикла модельного ряда применительно к информационным системам может быть расписана в таком виде:

1. Разработка концепта модельного ряда. Проектирование первичного набора характеристик. Применительно к маркам операционных систем ядра NT 5x модельный ряд получился таким: NT 5x: 2000, xp, 2003, 2003 64bit, xp 64bit. Данный модельный ряд объединен практически одинаковым набором драйверов и приложений.

2. Выпуск тестовой серии. Обычно при выполнении разработки современных информационных систем и различного оборудования выпускают версии для тестирования.

3. Разработка усовершенствования. В процессе анализа результата выпуска нескольких версий beta информационных систем выполняются исправления (при выпуске Windows выполняются несколько обычных исправлений).

4. Непосредственный выпуск марки в жизнь. После исправления всех недоработок информационной системы выпускают итоговую версию информационной системы. Например, первые версии Windows 2000 были выпущены в 1994, а итоговая версия была представлена в 2000 году.

5. Эксплуатация марки в течение некоторого периода. Например, мы выпускаем ОС

со сроком поддержки. В течение этого срока обеспечивается поддержка эксплуатации данной марки.

6. Готовим на основе предыдущего пункта новый модельный ряд. По результатам выпуска предыдущего модельного ряда готовят следующий модельный ряд, при этом в некоторых случаях иногда часть функций из нового модельного ряда добавляют в экземпляр предыдущего ряда. Windows vista (первый представитель ядер NT 6x) начали разрабатывать раньше Windows XP, тем не менее Windows XP была выпущена на 5 лет раньше.

7. Начинаем запуск нового модельного ряда с процессом поддержания старого. Поскольку переход со старого модельного ряда на новый процесс не быстрый, то необходимо организовать поддержку старого модельного ряда (после того как вышла Windows vista – поддержку операционных систем Windows XP и 2000 не прекратили).

8. Постепенно сворачиваем выпуск старого модельного ряда. После того как новый модельный ряд был принят клиентами, имеет смысл сворачивать выпуск старого модельного ряда. Например, после выпуска Windows 7 продавать Windows XP перестали. Также перестали выпускать основные пакеты обновлений, оставив выпуск базовых заплаток.

9. Сворачиваем поддержку. Прекращаем поставку обновлений для информационной системы. Например, с полным прекращением поддержки пользователей Windows XP – система в текущем году используется для Интернета на 0,2% пользователей.

Данная последовательность действий является упрощенной, так как детально не отображены промежуточные стадии выпуска.

Для жизненного цикла модели Боэма структура этапа эксплуатации в кратком и более подробном варианте изображена на рисунке 2, и уточнённый вариант с прорисовкой эксплуатации экземпляра – на рисунке 3.

На рисунке 4 блок производства комплектующих для клиентов, который не был отображен в общей схеме модели Боэма, выполняет функции выпуска исправлений и запчастей. Его аналогом для старых моделей является блок поддержки производства комплектующих для клиентов на дополнительный период. Работа обоих блоков осуществляется до тех пор, пока в этом обнаруживается техническая необходимость со стороны компании.

Про особенности удаленной и непосредственной эксплуатации приводить детальное описание бессмысленно. С нашей точки зрения, необходимо отметить только одну особенность: для удаленной эксплуатации провести техническое обслуживание аппаратной части

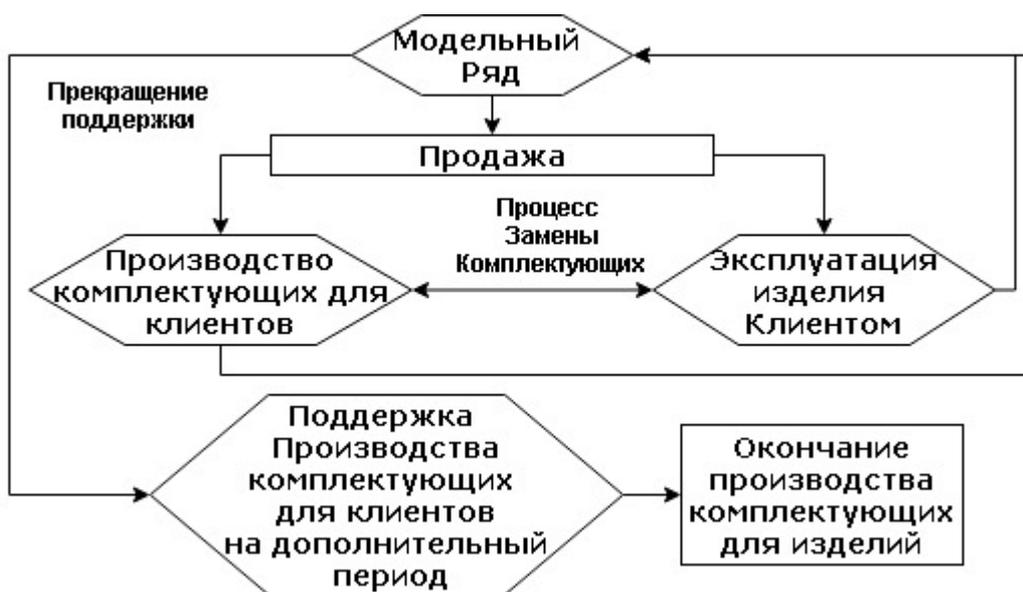


Рис. 2. Структурная схема этапа эксплуатации модели Боэма

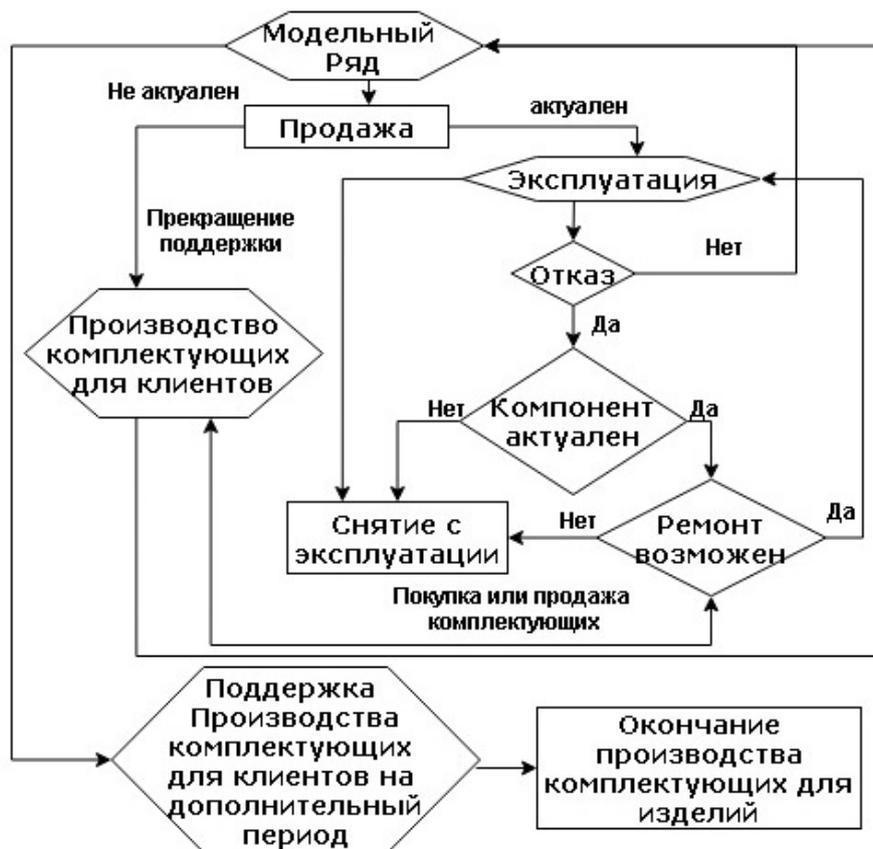


Рис. 3. Схема с уточнением эксплуатации экземпляра в модели Боэма

невозможно. Максимум можно логически изолировать поврежденный компонент при наличии такого функционала.

Из последнего типа классификации имеет смысл рассмотреть только экстремальную эксплуатацию, так как базовая эксплуатация является общеизвестной, и поэтому в детализации не нуждается.

Эксплуатация экспериментального образца. Данный тип эксплуатации является особенным ввиду того, что данный вид эксплуатации входит в типы жизненных циклов, предназначенных для разработки экспериментальных вариантов информационных систем и технических изделий.

Особенности жизненного цикла экспериментального образца:

1. Возможным несовпадением заявленных в техническом задании характеристик с выбранным экземпляром для тестирования.
2. По своей структуре он похож на цикл Боэма. Это связано с тем, что зачастую используется механизм детализации данных.

3. По принадлежности – является эксплуатацией типа марки.

Следовательно, несмотря на технические различия в постановке задачи эксперимента, методологии, экономики и прочих важных параметров, экспериментальную эксплуатацию можно представить следующим образом:

1. Запускается цикл испытаний. Для информационных систем понятие «цикл испытаний» подразумевает цикл тестирований на ошибки.
2. Если результатом цикла испытаний являются ошибки – цикл обрывается. Если цикл испытаний пройден успешно по заданным критериям, можно считать, что информационная система или техническое изделие готово для выпуска в серии.
3. Для прерывания по причине ошибки запускается процесс анализа причин. Если по выбранным критериям имеются небольшие отклонения, которые не считаются критическими, тогда допускается доработка решения с последующим перезапуском цикла испытаний.

4. Если степень отклонения является критической, то тогда необходимо выполнить анализ на актуальность технического изделия или информационной системы. Такая необходимость продиктована особенностями разработки проекта.

5. В случае когда возможности исправлений представляют практическое применение с точки зрения заказчика и исполнителя, тогда ошибки исправляются в дополнительный срок. В ином случае проект прекращается с выработкой новой концепции и перезапуском цикла разработки.

В графическом варианте указанный алгоритм изображен на рисунке 4.

Таким образом, приведенная детализация понятия технической эксплуатации позволяет существенно улучшить возможности как со стороны заказчика, так как процесс рассматривается в первую очередь с его стороны, так и со стороны подрядчика.

Необходимость в расширенном представлении связана в простейшем случае с тем фактом, что понятие эксплуатация в технические науки пришло из экономики, а как было рассмотрено выше, это понятие в технике может быть разделено на непосредственное использование на месте и техническое обслуживание.

Особенность технического обслуживания заключается в том, что оно может быть следующим:

1. Глобальное – техническое изделие забирают в компанию подрядчика.
2. Локальное – техническое изделие не покидает здание компании.

В свою очередь, изделие в непосредственном использовании может выглядеть таким образом:

1. Изделие находится на складе. Оборудование не утилизировано, числится на балансе. Оно фактически не используется, од-

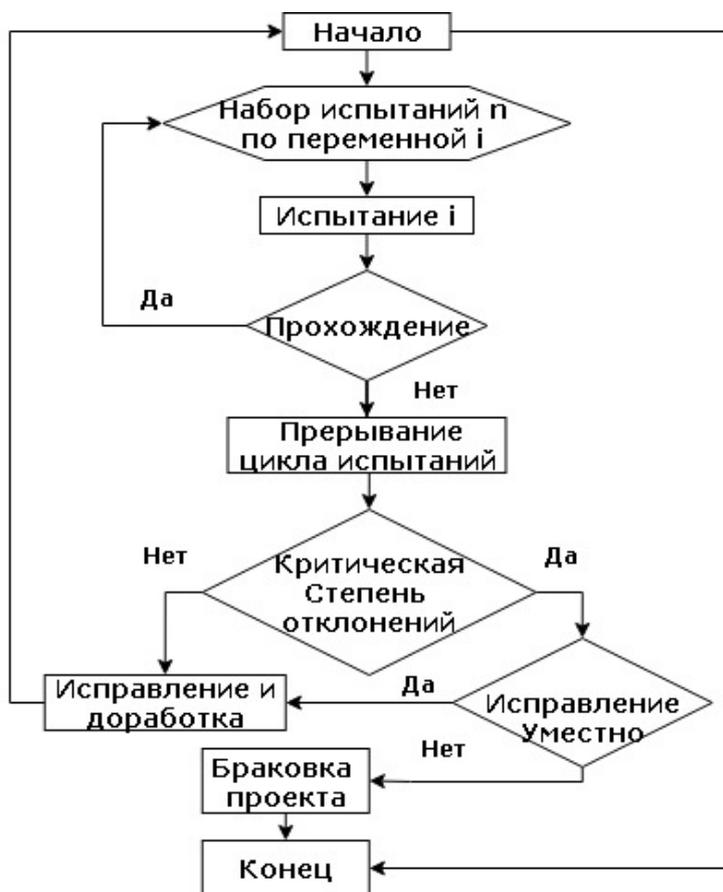


Рис. 4. Блок-схема эксплуатации экспериментального типа

нако при хранении происходит порча изделий полупроводника (процесс зависит от условий хранения, и, тем не менее, такое происходит регулярно).

2. Изделие используется непосредственно. Оборудование используется непосредственно.

Тем не менее, так как в 80-е годы вычислительная техника только получала распространение (это была эпоха 8-ми и 16-тибитных вычислительных систем), домашнего способа отремонтировать изделия не было. Современные же компьютеры во многих компаниях либо непосредственно на месте путем простой замены запчастей спокойно редактируются, или же через подрядные организации прекрасно ремонтируются.

Более того, механизмы обновления Windows с выпуска нескольких сервис-паков перешли на динамический назойливый механизм обновления, который иногда приходится отключать современным системным администраторам. Более того, в настоящее время появилось целое успешное поколение систем, основанных на стандартах GNU – например, это Linux и его коммерческий аналог, который был реализован корпорацией Google – операционная система android, используемая практически в каждом смартфоне сегодня.

В качестве практического применения приведенный в статье подход можно использовать

к полученному результату [11] автором работы.

Таким образом, детализация этапа эксплуатации позволяет максимально повысить эффективность использования финансовой составляющей на оборудование, так как расширенное представление об эксплуатации позволяет.

В рамках статьи была произведена классификация понятия техническая эксплуатация в рамках модели жизненного цикла информационных систем. Были рассмотрены основополагающие типы технической эксплуатации по различным признакам, в числе которых месторасположение эксплуатируемого объекта, по набору объектов, объединенных определенными общими признаками (марка и отдельный экземпляр), а также отдельно рассмотрено понятие испытаний, которое с точки зрения жизненного цикла информационных систем является особым типом эксплуатации системы.

При этом было показано, что все указанные типы эксплуатации имеют определенное влияние на разработку, проектирование и использование информационной системы. Более того, было показано, что экстремальный тип эксплуатации является постоянным спутником информационных систем и обладает отдельным, специфическим наполнением.

Дополнительно приведены общие модели этапов эксплуатации и рассмотрены изменения классической теории жизненных циклов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мокряков А. В. & Приходько Д. И. Общие концепции и идеи теории эксплуатации в контексте вычислительной техники // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2020. № 12. С. 88-92.
2. Мокряков А. В. & Приходько Д. И. Критерии анализа эксплуатационных характеристик первичных мультизагрузчиков // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2020. № 12. С. 93-96.
3. Dong Z., Guo Y., Gong Y., Li C. A high reliability radiation hardened on-board computer system for space application // Proceedings – 20166th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC. 2016. №7774866. Pp. 671-674. DOI: 10.1109/IMCCC. 2016.82.
4. Narita T., Taeda M., Kato M., Kusano M., Masukawa K., Takada M., Takada H., Ishida T., Fukuda S., Matsuzaki K., Takahashi T., Nomachi M. High-reliability SpaceWire engine implemented on the SOISOC3 microprocessor: Components, short paper // Proceedings of the 20167th International SpaceWire Conference, SpaceWire 2016. № 7771608. DOI: 10.1109/SpaceWire. 2016.7771608.

5. *Polo Ó. R., Sánchez J., da Silva A., Parra P., Hellín A. M., Carrasco A., Sánchez S.* Reliability-oriented design of on-board satellite boot software against single event effects // *Journal of Systems Architecture*, 114. 2021. №101920. DOI: 10.1016/j. sysarc. 2020.101920
6. *Jung S., Choi J. P.* Predicting system failure rates of SRAM-based FPGA on-board processors in space radiation environments // *Reliability Engineering and System Safety*, 183. 2019. Pp. 374-386. DOI: 10.1016/j. ress. 2018.09.015.
7. *Горшков В. В., Приходько Д. И. & Мокряков А. В.* Устройство для управления конфигурацией вычислительной системы. (2021). Патент на полезную модель 207176 U1, 15.10.2021. Заявка №2021118609 от 25.06.2021.
8. *Горшков В. В., Приходько Д. И. & Мокряков А. В.* Устройство для управления разрядностью вычислений. (2022). Патент на полезную модель 209758 U1, 22.03.2022. Заявка №2021118607 от 25.06.2021.
9. *Chen H., Wang J., Chen X.* DSP and ARM9 based swift switchover device for auxiliary power (2009) *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 29 (12). Pp. 116-118.
10. *Velychko, O., Hrabovskyi, O., Gordiyenko, T., Volkov, S.* Modeling of the Process Approach to the Life Cycle of Measuring Instruments (2021) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3. Pp. 93-102. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231225.
11. *Дебиев М. В., Магоматов Р. А-М., Амхаев Т. Ш., Зиниев Ш. З.* Эффекты внедрения автоматизированных электроэнергетических систем на основе интеллектуальных сетей // *Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XVII. 2021. № 1 (23). С. 15-20.*

## CLASSIFICATION OF TECHNICAL OPERATION OF INFORMATION SYSTEM AND EXTENDED STAGE OF EXTRACTION IN MODERN LIFE CYCLE MODELS

© D. I. Prikhodko<sup>1</sup>, A. V. Mokryakov<sup>2</sup>, V. V. Gorshkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*FSU FNC NIISI RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*MAI, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Russian State University named after A. N. Kosygin, Moscow, Russia*

The article understands the concept of technical operation of information systems from the point of view of life cycle theory in relation to information systems. The author's approach to the concept of technical operation in relation to modern information systems is proposed. A classification of technical operation was proposed by the number of products, by remoteness, and by belonging to the experiment. Taking into account the proposed content of the concept of modern technical operation, extended representations of flow diagrams of operation stages were proposed for the main types of life cycles: cascade and version life cycle models. The features of the life cycle of the information systems under testing were identified and the features of their life cycles from the point of view of the stage of development of information systems were described. It has been shown that the operation stage of such information systems has its specific features that can be used in the development of information systems designed to operate in extreme conditions.

**Keywords:** life cycle of information systems, technical operation, operation as element life cycle.

## REFERENCES

1. Mokryakov, A. V. and Prikhodko, D. I. (2020) Obshchie kontseptsii i idei teorii ekspluatatsii v kontekste vychislitel'noi tekhniki. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki*. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. [The general concepts and the ideas of the theory of operation in the context of computer facilities. Modern science: current problems of the theory and practice]. Series: Natural and technical science. №12. Pp. 88-92.
2. Mokryakov, A. V. and Prikhodko, D.I. Kriterii analiza ekspluatatsionnykh kharakteristik pervichnykh mul'tizagruzchikov. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki*. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. [Criteria of the analysis of operational characteristics of primary multiloaders. (2020). Modern science: current problems of the theory and practice]. Series: Natural and technical science. №12. Pp. 93-96.
3. Dong, Z., Guo, Y. and Gong, Y., Li, C. (2016) A high reliability radiation hardened on-board computer system for space application Proceedings – 20166th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2016, №7774866, pp. 671-674. DOI: 10.1109/IMCCC.2016.82.
4. Narita, T., Taeda, M., Kato, M., Kusano, M., Masukawa, K., Takada, M., Takada, H., Ishida, T., Fukuda, S., Matsuzaki, K., Takahashi, T. and Nomachi, M. (2016) High-reliability SpaceWire engine implemented on the SOISOC3 microprocessor: Components, short paper Proceedings of the 20167th International SpaceWire Conference, SpaceWire 2016, №7771608. DOI: 10.1109/SpaceWire.2016.7771608.
5. Polo, Ó. R., Sánchez, J., da Silva, A., Parra, P., Hellín, A. M., Carrasco, A. and Sánchez, S. (2021) Reliability-oriented design of on-board satellite boot software against single event effects *Journal of Systems Architecture*, 114, №101920. DOI: 10.1016/j.sysarc.2020.101920
6. Jung, S. and Choi, J. P. (2019) Predicting system failure rates of SRAM-based FPGA on-board processors in space radiation environments *Reliability Engineering and System Safety*, 183, pp. 374-386. DOI: 10.1016/j.res.2018.09.015.
7. Gorshkov, V. V., Prikhodko, D. I. and Mokryakov, A. V. (2021) Ustroistvo dlya upravleniya konfiguratsiei vychislitel'noi sistemy. Patent na poleznuyu model' 207176 U1, 15.10.2021. Zayavka №2021118609 ot 25.06.2021. [Device for managing the configuration of a computer system]. A patent for utility model 207176 U1, 15.10.2021. Application №2021118609 dated 25.06.2021.
8. Gorshkov, V. V., Prikhodko, D. I. and Mokryakov, A. V. (2022) Ustroistvo dlya upravleniya razryadnost'yu vychislenii. [Device for managing the bit ratio of calculations]. A patent for utility model 209758 U1, 22.03.2022. Application №2021118607 dated 25.06.2021.
9. Chen, H., Wang, J. and Chen, X. DSP and ARM9 based swift switchover device for auxiliary power (2009) *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 29 (12), pp. 116-118.
10. Velychko, O., Hrabovskyi, O., Gordiyenko, T. and Volkov, S. Modeling of the Process Approach to the Life Cycle of Measuring Instruments (2021) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, pp. 93-102. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231225.
11. Debiev M.V., Magomadov R. A-M., Amkhaev T.Sh. and Ziniev Sh.Z. (2021) Effekty vnedreniya avtomatizirovannykh elektroenergeticheskikh sistem na osnove intellektual'nykh setei. [Effects of introducing automated electric power systems based on smart grids]. *GGNTU Bulletin. Engineering Sciences*, Volume XVII, №1 (23), pp. 15-20.

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 666.766-127

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.69.58.008

### ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

© Н. Г. Василевская<sup>1</sup>, И. Г. Енджиевская<sup>1</sup>, Н. М. Кочеткова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Красноярский строительный техникум, Красноярск, Россия

Актуальность работы «Композиты для высокотемпературной теплоизоляции» заключается в уменьшении сырьевых затрат на производство высокотемпературных теплоизоляционных, изготавливаемых из вермикулита Татарского месторождения и перлита Мухор-Талинского месторождения, разработка их составов и технологии для производства, а также поддержка государственной программы энергоэффективности. Первоначально материал разрабатывается для теплоизоляции электролизеров и рассчитан на работу при высоких температурах. В работе были определены оптимальные технологические параметры, а именно гранулометрический состав, соотношение компонентов в сырьевой смеси и их влияние на прочностные и теплоизоляционные свойства конечного продукта. Была проведена оценка влияния плотности связующего для композита и установлены предельные границы его плотности для получения максимальных прочностных свойств, с возможностью его экономии. В ходе выполнения работы также были отработаны режимы вспучивания перлитовой руды, для получения вторичного сырьевого компонента. Исследование позволило выявить экономию в сырьевых материалах до 15-20%.

**Ключевые слова:** композиты, высокотемпературная теплоизоляция, вермикулит, перлит, вспучивание.

Для практического применения минерального сырья используют неметаллические ископаемые, такие как керамическое и огнеупорное сырье (кварц, кварцевые пески, полевои шпат, каолин, глины огнеупорные и другие), горнотехническое сырье (мусковит, вермикулит, целолиты, графит, магнезит, перлит и т. д.). Чаще всего минеральное сырье залегает пластами разной толщины. Для оценки полезности месторождения проводится исследование с целью использования его, чаще в области производства строительных материалов – обеспечение потребностей строительного комплекса собственным строительным материалом. Энергосбережение является одной из наиболее актуальных задач российской экономики. Го-

сударственная программа «Повышение энергетической эффективности в промышленности» предполагает снизить энергозатраты в промышленности за счет мероприятий, согласованных в рамках среднесрочных добровольных соглашений Правительства Российской Федерации с крупными холдингами и компаниями. Планируемые показатели повышения энергоэффективности в относительном снижении: общей энергоемкости промышленного производства, общей электроемкости производства и электроемкости алюминия [1-5].

Одним из направлений для реализации этой программы на предприятиях по производству алюминия является использование высокоэффективных теплоизоляционных ма-

Таблица 1.

## Химический состав вермикулита Татарского месторождения, %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	ппп
40,29	10,92	14,47	17,94	4,08	7,8-8,3	4,35

териалов. Такие теплоизоляционные материалы должны обладать низким коэффициентом теплопроводности при высоких температурах, высокой стойкостью к перепадам температур, достаточной прочностью (в том числе и транспортировочной), низкой линейной усадкой при нагреве, экологической безопасностью, достаточной долговечностью (максимальный срок сохранения материалом всех перечисленных качеств). Анализ опыта различных стран в решении данного вопроса энергосбережения показывает, что наиболее эффективным является сокращение потерь тепла через промышленное оборудование [6-10].

В Красноярском крае функционируют несколько алюминиевых заводов, на которых в качестве теплоизоляционных материалов для электролизеров при производстве алюминия используются вермикулитовые плиты, пендиатомитовые кирпич и плиты, а также шамотный кирпич. Каждый из вышеперечисленных материалов имеет свои преимущества и недостатки. Однако еще одним важным фактором

в современных условиях является стоимость изделия, которую можно регулировать, разрабатывая композиционный материал [11-20]. Для этой цели были проведены исследования получения такого материала из композита, включающего вспученные вермикулит и перлит, которые обладают такими уникальными свойствами, как низкая средняя плотность и теплопроводность, экологичность, а используются в основном в качестве теплоизоляционной засыпки. В качестве основного компонента – композита, который выполняет роль заполнителя для производства теплоизоляционного материала, использовался вспученный вермикулит Татарского месторождения, находящийся в Северо-Енисейском районе Красноярского края. Концентрат Татарского месторождения отличается красно-коричневым оттенком, имеет коэффициент вспучивания 5-9 в зависимости от крупности. Размер чешуек около 1-3 мм. Химический состав вермикулита Татарского месторождения отражен в таблице 1.

Таблица 2.

## Свойства вспученного вермикулита Татарского месторождения

№ п/п	Наименование показателей	Размер фракций, мм		
		0,5-0,18	1-0,355	2-0,71
1	Массовая доля основной фракции, % не менее	70-80	70-80	70-80
2	Массовая доля вермикулита, не менее	85	90	90
3	Насыпная плотность концентрата до обжига, кг/м <sup>3</sup>	900-1200	900-1200	800-1000
4	Массовая доля влаги до обжига, % не более	4	4	4
5	Насыпная плотность вспученного концентрата, кг/м <sup>3</sup>	120-200	100-150	90-110
6	Коэффициент вспучивания	5-7	6-9	7-10
7	Коэффициент теплопроводности, Вт/м <sup>0</sup> К	0,089	0,076	0,056-0,059

Таблица 3.

## Химический состав перлита, %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
71,78	12,77	4,10	3,00	1,54	1,31	0,60	0,90

Анализируя химический состав вермикулита, видим, что в общей массе железо представлено в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, поэтому цвет вермикулита темно-бурый, после обжига светло-золотистый, это характерно для окиси железа. Вермикулит Татарского месторождения относится к магниевому вермикулиту. Отличительной особенностью этого вермикулита является невысокое содержание межслоевой воды, хотя этот фактор не оказывает решающего влияния на степень вспучивания при обжиге. При этом получается достаточно легкий вермикулит в мелкой фракции концентрата. Основные свойства вспученного вермикулита представлены в таблице 2.

Вторым компонентом композита использовали перлит Мухор-Талинского месторождения Республики Бурятия, удовлетворяющего нормативным требованиям. Типовой химический состав вспученного перлита отражен в таблице 3.

Перлитовая руда в зависимости от фракционного состава имеет насыпную плотность от 800 до 1300 кг/м<sup>3</sup>. В исследовании вспучивание породы проводили в лабораторной муфельной печи при температурах: 950<sup>0</sup>С; 1000<sup>0</sup>С; 1100<sup>0</sup>С. С повышением температуры наблюдалось изменение цвета породы в сторону белого и уменьшение его насыпной плотности. Наличие в составе карбоната кальция предполагает, что вспучивание сырья идет в два этапа. До температуры 900<sup>0</sup>С происходит процесс разложения карбоната кальция и небольшое увеличение объема зерна. При дальнейшем увеличении температуры до 1000<sup>0</sup> С и выше идет удаление химически связанной воды и окончательное вспучивание перлитового зерна.

Дифференциально-фазовый анализ перлитовой породы проводился с целью определения количества химически связанной и свободной воды и отражен на рисунке 1. Нагрев

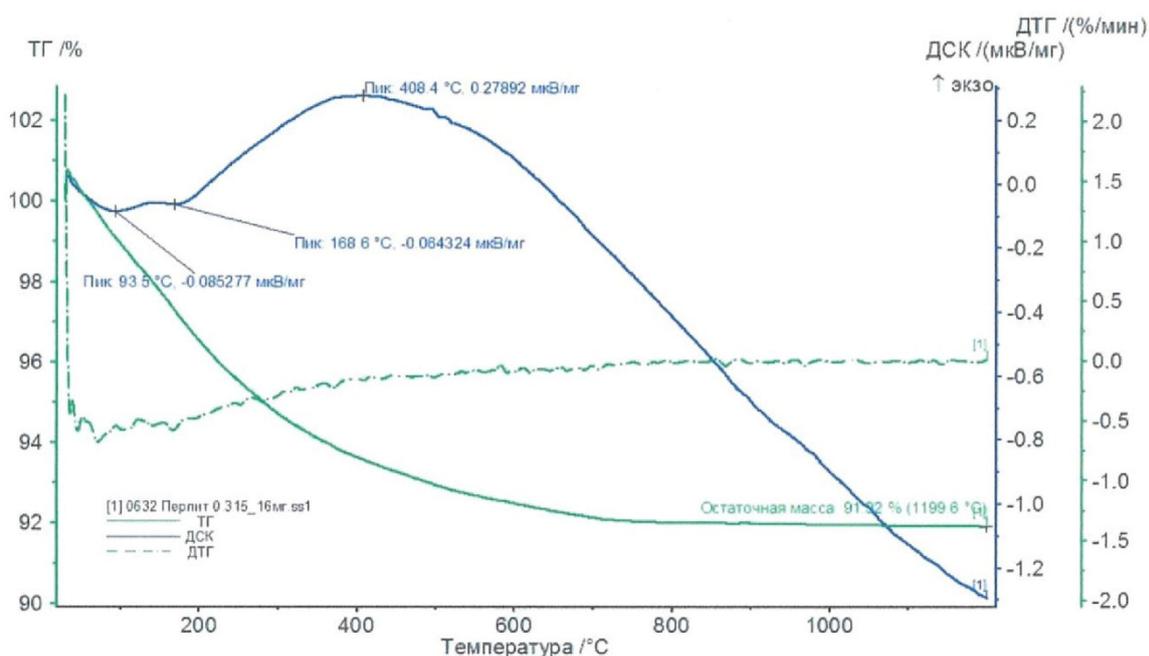


Рис. 1. Дифференциально-фазовый анализ вспученного перлита

пробы при проведении анализа проводили до температуры 1200°C.

Как видно из рисунка 1, дифрактограмма вспученного перлита показывает, что перлит имеет четкую аморфную структуру, состоящую в основном из карбоната кальция и оксида кремния и имеет большое количество химически связанной воды и влаги. Наличие связанной воды в количестве 5-8%, что очень много. Основная часть воды удаляется еще до 300°C, оставляя в зерне связанную воду в количестве 3-4%, что подходит для получения вспученного щебня.

Были проведены исследования использованием вермикулита Татарского месторождения и перлита Мухор-Талинского месторождения для получения высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Такие теплоизоляционные материалы должны обладать низким коэффициентом теплопроводности при высоких температурах, высокой стойкостью к перепадам температур, достаточной прочностью (в том числе и транспортировочной), низкой линейной усадкой при нагреве, экологической безопасностью, достаточной долговечностью (максимальный срок сохранения материалом всех вышеперечисленных качеств).

Проводимые исследования направлены на повышение эксплуатационных характеристик и долговечности плит для высокотемпературной изоляции, получаемых из вермикулита Татарского месторождения, путем введения в состав вспученного перлитового песка Мухор-Талинского месторождения, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 10832-2009. Перлит имеет температуру применения до +900°C, pH=7, что препятствует образованию коррозии, нейтрален к действию слабых кислот и щелочей. Зерна перлита обладают более высокой прочностью, чем вспученный вермикулит, поэтому в прессуемом изделии он незначительно изменяется в объеме, в отличие от вермикулита при правильно подобранной высоте засыпки и давлении прессования, позволяет создавать более стабильную и долговечную структуру изделия.

Основной целью исследования являлось создание эффективного, долговечного и экологически безопасного высокотемпературного

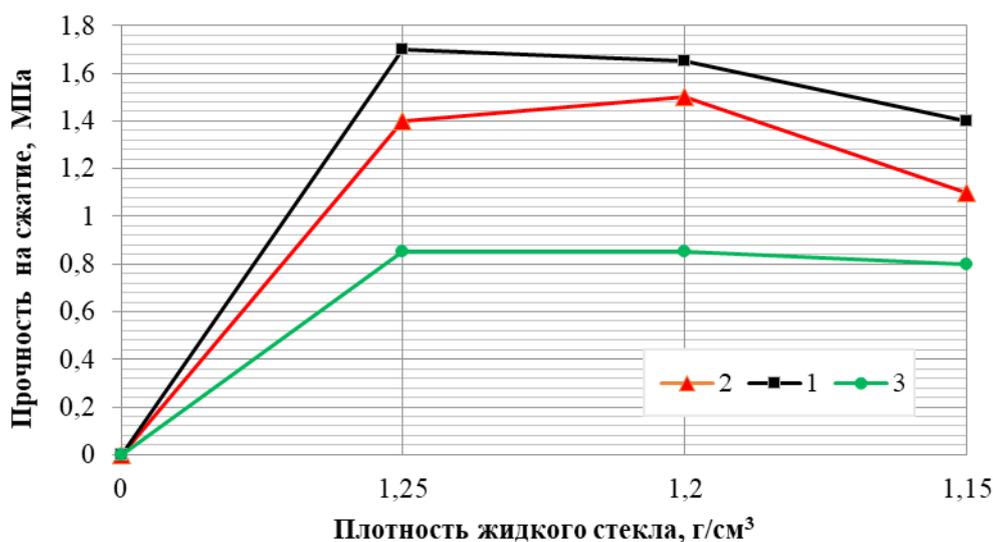
теплоизоляционного материала в виде плит на основе вермикулита и перлита, формируемых методом холодного прессования, с использованием в качестве связующего жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,6-3,0.

Для достижения этой цели решались следующие задачи: определялся оптимальный расход вяжущего, гранулометрический состав и расход перлита в сырьевой смеси, оптимальный коэффициент прессования. Основным критерием расхода перлита являлась средняя плотность изделий, которая при добавлении перлита в количестве 40-50% возрастает, что отрицательно сказывается на теплотехнических свойствах композита. Показатели средней плотности изделий ориентировались на требования технических условий плит для обеспечения эффективности изоляции (плотность изделия должна быть  $375 \pm 50$  кг/м<sup>3</sup>), в дальнейших исследованиях подобран расход перлита таким образом, чтобы плотность изделий находилась в пределах 350-420 кг/м<sup>3</sup>. Исходя из этого, количество перлита должно быть не более 30%. Увеличение приводит к ухудшению теплофизических свойств, то есть снижает основной показатель, характеризующий теплоизоляционный материал [20, 21].

В качестве связующего использовали жидкое стекло, плотностью 1,3 кг/м<sup>3</sup>. Принимались следующие соотношения вермикулита к перлиту: 1/1; 1,25/0,75; 1,5/0,5. Вспученный перлит брался смесью фракций 1,25; 0,63 и 0,315. Вермикулит использовали фракции 1 мм. Количество жидкого стекла (по анализу производственного опыта г. Железногорск) – наполнитель жидкое стекло = 1/0,048. Изготавливали образцы путем прессования на прессе и последующей сушкой в сушильном шкафу. После сушки проводили испытания.

Вначале было рассмотрено влияние плотности жидкого стекла на прочность образцов. Для этого меняли плотность жидкого стекла, которая отличалась к каждой серии на 0,05г/см<sup>3</sup>. Средние результаты для каждой из исследуемых плотностей представлены на рисунке 2.

Исходя из полученных результатов, видно, что снижение плотности жидкого стекла ниже 1,25 г/см<sup>3</sup> нежелательно ввиду того, что клеящая способность стекла слишком низкая



**Рис. 2.** Изменение прочности от плотности жидкого стекла

**Примечание:** 1 – соотношение вермикулита к перлиту 1/1; 2 – соотношение вермикулита к перлиту 1,25/0,75; 3 – соотношение вермикулита к перлиту 1,5/0,5.

и не обеспечивает требуемой прочности. Соотношение вермикулита к перлиту 1,5/0,5 имеет небольшие значения по прочности, поэтому в дальнейших исследованиях это соотношение является нежелательным.

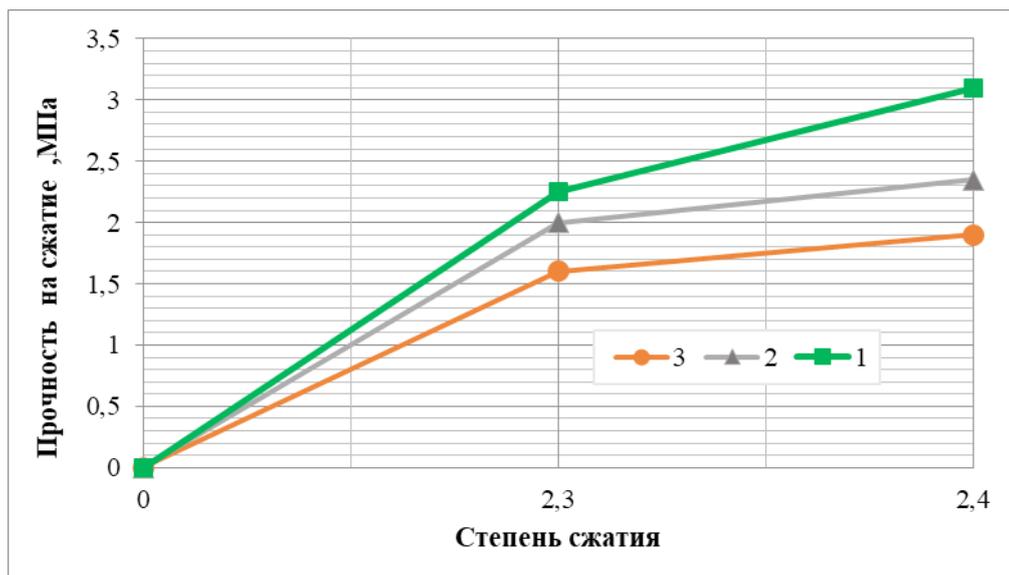
Исследовалось влияние коэффициента прессования на прочность композиционного материала с учетом оптимального содержания перлита. Коэффициент прессования варьировался в пределах 1,5-3,0. При указанных коэффициентах прессования зерна перлита встраиваются в структуру материала с наименьшими разрушениями, образуя каркас, препятствующий хрупкому разрушению частиц вермикулита. Перлит при указанных коэффициентах прессования не изменяется в объеме, что дает экономию в расходе сырьевой смеси, а именно, в расходе дорогостоящего вспученного вермикулита, который дороже перлита на 50-100%. Зерна вермикулита хрупкие и легко разрушаются при прессовании, но имеют высокую открытую пористость, а также отражательную способность. Использование перлита в качестве компонента сырьевой смеси позволяет уменьшить высоту засыпки, ее форму и обеспечить прочность при снижении давления при прессовании от 2,5 (для вермикуловых плит без добавки перлита) до 2,2-2,3, а также

снизить разрушение частиц вермикулита в пределах перлитового каркаса. Указанный коэффициент прессования позволяет получить требуемую прочность при сжатии, равную 1,1-1,2 МПа. Таким образом, введение перлита в композиционный материал в количестве 30% уменьшает расход сырья на производстве изделий до 23%.

При указанных технологических параметрах изделия имеют четкие, неосыпающиеся грани, это свидетельствует о правильно подобранном коэффициенте прессования, оптимальной плотности жидкого стекла и хорошей гомогенизации сырьевой смеси со связующим.

Увеличение давления прессования до коэффициента 2,5 позволяет снизить расход перлита в сырьевой смеси. Снижение коэффициента сжатия ниже 2,2 отрицательно сказывается на прочностных свойствах изделий, их долговечности. Внешний вид изделий не кондиционный, рыхлый, появляются сколы на ребрах, закрытые поры диаметром более 3 мм.

На прочность композиционного материала оказывают влияние гранулометрический состав перлита и плотность жидкого стекла. Для изучения влияния гранулометрического состава использовали фракции зерен перлита 1,25; 0,63 и 0,315 мм. Соотношение вермикулита к



**Рис. 3.** Влияние гранулометрического состава перлита на прочность образцов  
3 – фракция 1,25 мм; 2 – фракция 0,63 мм; 1 – фракция 0,315 мм

перлиту составляло 1:1, плотность жидкого стекла 1,3 г/см<sup>3</sup>, степень сжатия в 2,3 и 2,4. Результаты влияния гранулометрического состава перлита на прочность изделия отображены на рисунке 3.

Анализируя полученные данные, видно, что с увеличением размера фракции зерна перлита пропорционально увеличивается прочность изделий. Для изготовления плит требуется смесь с содержанием фракций 0,63-1,25 в диапазоне 70-80%, а оставшаяся часть отводится для фракции 0,315 и более мелких частиц. Увеличение степени сжатия в 2,4 раза при наличии в композите перлита является большой, так как он, в отличие от вермикулита, не является материалом с незначительными упругими свойствами и под действием нагрузки, превышающей требуемую, идет слабое нарушение структуры зерен перлита, что слышно при прессовании образца. Вермикулит при его прессовании в 2,5-3,5 раза будет прочнее, но перлит будет трескаться и ломаться, образуя слабые зоны в теле композита.

Таким образом, установлено увеличение

производства эффективных теплоизоляционных материалов для высокой температурной изоляции с использованием имеющихся производственных фондов. Предлагаются возможные пути продления сроков службы изделий для высокой температурной изоляции, что является одной из проблем строительного материаловедения. Совмещение положительных свойств вермикулита, таких как высокая отражательная способность его частиц, их упругость, а также благодаря тонким прослойкам воздуха между слюдяными чешуйками, в композиции с более высокими по прочности зернами перлита, образующими каркас при прессовании, их взаиморасположением в матрице, обеспечивает композиционному материалу низкую теплопроводность, высокую температуростойкость, технологичность, долговечность при эксплуатации, а также нетоксичность. Можно считать, что разработанный композиционный материал на основе перлита и вермикулита в полной мере является экологически чистым и качественным строительным материалом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ставер П. К. Исследования вермикулита Татарского месторождения и получение теплоизоляционных материалов на его основе / П. К. Ставер, Г. А. Полетаев // VII Всероссийская конференция «Молодёжь и наука». Красноярск, 2011.

2. *Максимова О. М.* Руководство по выполнению огнезащитных и теплоизоляционных штукатурок механизированным способом / О. М. Максимова, В. А. Гордиенков. М.: Стройиздат, 1977.
3. ТУ 5767-014-2168872-2004 плиты вермикулитовые теплоизоляционные.
4. *Дубенецкий К. Н.* Инаглинский вермикулит, растворы и бетоны на его основе / К. Н. Дубенецкий, А. П. Пожнин, Ю. М. Тихонов // Сб. докладов XXVII научной конференции ЛИСИ. 1969. С. 15-18.
5. *Opoczky L.* Problems relating to grinding technology and quality when grinding composite cements / L. Opoczky // Zement – Kaik – Gips. 1993. V. 46. №3. S. 136-140.
6. *Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Нахаев М. Р.* Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 73-77.
7. *Дубенецкий К. Н.* Вермикулит (свойства, технологи и применение в строительстве) / К. Н. Дубенецкий, А. П. Пожнин. Л.: Стройиздат, 1971. С. 176.
8. *Жуков А. В.* Вспученный перлит / А. В. Жуков, М. Я. Байвель, И. С. Солоненко. М.: Стройиздат, 1962. С. 98.
9. *Кальянов Н. Н.* Вермикулит и перлит пористые заполнители для теплоизоляционных бетонов и растворов / Н. Н. Кальянов, А. Н. Мерзьяк. М.: Госстройиздат, 1961. С. 153.
10. *Мамина А. Х.* Механизм и свойства химически вспученного вермикулита Ковдорского месторождения / А. Х. Мамина, В. А. Муромцев, Н. В. Золотухина // Химия и технология минерального сырья: тезисы докладов конференции. Мурманск, 1987. С. 82-83.
11. Современные эффективные теплоизоляционные материалы // Обзор ВНИИЭСМ. М., 1980. С. 96.
12. *Попов Н. А.* Легкие бетоны на пористых заполнителях / Н. А. Попов. М.: Стройиздат, 1964. С. 205.
13. *Жуков А. В.* Опыт производства вспученного перлита и вермикулита в Канаде / А. В. Жуков // Строительные материалы, детали и изделия. Киев, 1965. Вып. 5.
14. *Овчаренко Е. Г.* Перспективы и применение вспученного перлита / Е. Г. Овчаренко // Строительные материалы. 1992. №2. С. 14-15.
15. *Геммерлинг Г. В.* Применение вермикулита в строительстве / Г. В. Геммерлинг // Материалы совещания по проблемам вермикулита. КФ АН СССР Апатиты, 1963. С. 28-33.
16. *Жуков А. В.* Материалы на основе вспученного перлита / А. В. Жуков // М.: Стройиздат, 1977. С. 160.
17. *Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш.* Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т. 46). С. 65-70.
18. Power T. Perlite and vermiculit / T. Power // Industrial minerals (USA). №23. 1986. P. 39-49.
19. Airlaced vermiculite concrete for insulating fire – proofing – Pit and Quarry. V. 45. №2. 1953. P. 163.
20. *Fokina E. L.* Planetary mills of periodie and continuous action / E. L. Fokina, N. I. Budim, G. G. Chemik // I Materials Sci 2004. V. 39. P. 5217-5221.
21. *Murtazayev S. A. Yu., Salamanova M. Sh., Mintsayev M. Sh., Bisultanov R. G.* Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. P. 500-503.
22. *Bataev D. K-S., Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Viskhanov S. S.* Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклинкерных вяжущих щелочной активации) // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. P. 457-460.

## ENVIRONMENTALLY SAFE COMPOSITE MATERIAL FOR HIGH-TEMPERATURE THERMAL INSULATION

© N. G. Vasilovskaya<sup>1</sup>, I. G. Yendzhievskaya<sup>1</sup>, N. M. Kochetkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Krasnoyarsk Construction College, Krasnoyarsk, Russia*

The relevance of the work “Composites for high – temperature thermal insulation” is to reduce the raw material costs for the production of high-temperature thermal insulation made from vermiculite of the Tatar deposit and perlite of the Mukhor – Talinsky deposit, the development of their compositions and technologies for production, as well as support for the state energy efficiency program. Initially, the material is developed for thermal insulation of electrolyzers and is designed to work at high temperatures. The optimal technological parameters were determined, namely the granulometric composition, the ratio of components in the raw mixture and their effect on the strength and thermal insulation properties of the final product. The influence of the binder density for the composite was evaluated and the limits of its density were set to obtain maximum strength properties, with the possibility of saving it. In the course of the work, the modes of perlite ore swelling were also worked out to obtain a secondary raw material component. The study revealed savings in raw materials up to 15-20%.

**Keywords:** composites, high-temperature thermal insulation, vermiculite, perlite, swelling

### REFERENCES

1. Staver, P.K. Staver, P. K. and Poletaev, G. A. (2011) ‘Issledovaniya vermiculita Tatarskogo mestorozhdeniya i poluchenie teploizolyatsionnykh materialov na ego osnove’. *VII Vserossiiskaya konferentsiya «Molodezh' i nauka»*. [Research of vermiculite of the Tatar deposit and obtaining heat-insulating materials based on it. VII All-Russian Conference “Youth and Science”], Krasnoyarsk.
2. Maksimova, O.M. Gordienkov, V. A. (1977) ‘Rukovodstvo po vypolneniyu ognenezashchitnykh i teploizolyatsionnykh shtukaturek mekhanizirovannym sposobom’. [Manual for the implementation of fire-retardant and heat-insulating plasters by mechanized method]. Stroyizdat. Moscow.
3. TU 5767-014-2168872-2004 heat-insulating vermiculite boards.
4. Dubenetsky, K. N., Pozhnin A. P. and Tikhonov, Yu. M. (1969) ‘Inaglinskii vermiculit, rastvory i betony na ego osnove’. *Sb. dokladov XXVII nauchnoi konfirentsii LISI*. [Inaglinsky vermiculite, mortars and concretes based on it. Sat. reports of the XXVII scientific conference LISI], pp. 15-18.
5. Opoczky, L. (1993) ‘Problems relating to grinding technology and quality when grinding composite cements’. *Zement – Kaik – Gips*. B. 46. №3. Pp. 136-140.
6. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Nakhaev, M. R. (2020) ‘Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v tsementnoi industrii’. *Stroitel'nye materialy*. [Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry. Construction materials]. № 1-2. Pp. 73-77.
7. Dubenetsky K.N. and Pozhnin, A. P. (1971) Vermikulit (svoistva, tekhnologi i primenenie v stroitel'stve. [Vermiculite (properties, technologies and application in construction)]. Stroyizdat. Leningrad. P. 176.
8. Zhukov, A. V. Baivel, M. Ya. and Solonenko, I. S. (1962) Expanded perlite. Stroyizdat, Moscow. P. 98.
9. Kalyanov, N. N. and Merzyak, A. N. (1961) ‘Vermikulit i perlit poristye zapolniteli dlya teploizolyatsionnykh betonov i rastvorov. [Vermiculite and perlite porous fillers for heat-insulating concretes and mortars]. Gosstroyizdat. Moscow. P. 153.

10. Mamina, A. Kh., Muromtsev, V. A. and Zolotukhina, N. V. (1987) 'Mekhanizm i svoistva khimicheskii vspuchennogo vermikulita Kovdorskogo mestorozhdeniya'. *Khimiya i tekhnologiya mineral'nogo syr'ya: tezisy dokladov konferentsii*. [Mechanism and properties of chemically expanded vermiculite of the Kovdor deposit. Chemistry and technology of mineral raw materials: abstracts of the conference reports]. Murmansk. Pp. 82-83.
11. (1980) *Sovremennye effektivnye teploizolyatsionnye materialy*. Obzor VNIIESM. [Modern effective heat-insulating materials. Review VNIIESM]. Moscow, pp. 96.
12. Popov, N. A. (1964) 'Legkie betony na poristykh zapolnitelyakh'. [Lightweight concretes on porous aggregates]. Stroyizdat. Moscow. P. 205.
13. Zhukov, A. V. (1965) 'Opyt proizvodstva vspuchennogo perlita i vermikulita v Kanade'. *Stroitel'nye materialy, detali i izdeliya*. [Experience in the production of expanded perlite and vermiculite in Canada. Building materials, parts and products]. Kyiv. Issue. 5.
14. Ovcharenko, E. G. (1992) 'Perspektivy i primeneniye vspuchennogo perlita'. *Stroitel'nye materialy*. [Prospects and application of expanded perlite. Construction materials]. №2. Pp. 14-15.
15. Gemmerling, G. V. (1963) 'Perspektivy i primeneniye vspuchennogo perlita'. *Stroitel'nye materialy*. [The use of vermiculite in construction. Proceedings of the meeting on the problems of vermiculite. KF ANSSSR Apatity]. Pp. 28-33.
16. Zhukov, A. V. (1977) *Materialy na osnove vspuchennogo perlita*. [Materials based on expanded perlite]. Stroyizdat. Moscow. P. 160.
17. Murtazaev, S-A. Yu. and Salamanova, M. Sh. (2018) 'Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoi prirody'. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. [Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. Privolzhsky scientific journal]. №2 (T. 46). Pp. 65-70.
18. Power, T. (1986) 'Perlite and vtrmiculit'. *Industrial minerals (USA)*. №23. P. 39-49.
19. (1953) Airlaced vermiculite concrete for insulating fire –proofing – Pit and Quarry. V. 45. №2. P. 163.
20. Fokina, E. L. Budim, N. I. and Chemik, G. G. (2004) 'Planetary mills of periodie and continuous action'. *I Materials Sci 2004*. V. 39. Pp. 5217-5221.
21. Murtazayev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh., Mintshev, M. Sh. and Bisultanov, R. G. (2019) 'Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging' *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503.
22. Bataev, D. K-S., Murtazayev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Viskhanov, S. S. (2019) 'Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders'. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СИНЕРЕЗИСЕ ГИДРОГЕЛЯ БЕНТОНИТА

© В. Х. Межидов<sup>1</sup>, Р. Х. Дадашев<sup>1</sup>, З. Ш. Гацаев<sup>1</sup>, Н. А. Галанина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

<sup>2</sup>МАДИ, Москва, Россия

Структура, состав и свойства бентонита зависят от месторождения. Нами проведены экспериментальные исследования синерезиса с использованием бентонита ЧР. В опытах экспериментально определяли объем синеретической жидкости, которая выделялась при синерезисе, в зависимости от следующих факторов: концентраций бентонита; содержания электролита KCl; продолжительности действия ультразвука. В результате проведенных опытов установлено, что бентонит ЧР относится к группе коллоидов, понижающих синеретическую жидкость. Измельчение частиц бентонита под действием ультразвука приводит к значительному увеличению объема синеретической жидкости. Добавление в гидрогель электролита KCl повышает синерезис и формирует ступенчатые графики, где рост объема синеретической жидкости прекращается на 30 и менее минут, образуя горизонтальные участки. Увеличение концентрации KCl повышает (и наоборот) протяженность полос (ступенек) одинаковых значений объемов синеретической жидкости. Мы объясняем появление ступенек коагуляционными свойствами KCl, который объединяет диспергированные частицы в агрегаты и хлопья. При этом в геле появляется свободная жидкая фаза, покидающая образец при меньшем гидравлическом сопротивлении микроскопических каналов в образце.

**Ключевые слова:** бентонит, суспензии, гель, синерезис, синеретическая жидкость.

Тонкодисперсные водные суспензии бентонита обладают тиксотропными свойствами и поэтому широко используются в бурении для выноса разбуренной породы. При встряхивании или перемешивании они подвижны подобно суспензиям низкой концентрации, а будучи в покое начинают переходить в неподвижное гелеобразное состояние. Считается, что коллоидные частицы бентонита в тонкодисперсных суспензиях формируют пространственные сетки. В таких гелях почти нет броуновского движения частиц дисперсной фазы, однако межмолекулярные силы Ван-дер-Ваальса, ориентационные и структурные изменения пространственных сеток со временем приводят к росту плотности гидрогеля с вытеснением дисперсионной среды – воды, в которой мало растворены минералы, сопутствующие бентониту. Этот процесс перехода геля в более равновесное термодинамическое состояние с выделением жидкости имеет название – синерезис. На интенсивность этого процесса влияют вид и концентрация дис-

персной фазы, температура, давление, pH, объем и форма образца. Роль этих факторов учитывается в технологии производства пищевой продукции, гелеобразных лекарственных форм, волокон, пластмасс, резины и т. д.

Синерезис наблюдается и в студнях с сеткой из макромолекул [1-3]. Причиной синерезиса могут быть и химические реакции, протекающие в геле, где твердые частицы размерами десятки и сотни нанометров имеют повышенную химическую и адгезивную активность. В процессе синерезиса геля наночастиц бентонита возможны физико-химические процессы, обусловленные их высокой активностью.

Более 70% бентонита составляет кристаллическое вещество – монтмориллонит (ММТ), имеющее структуру трехслойного пакета. Между этими пакетами располагаются катионы металлов Na, Ca, K, Mg, компенсирующие отрицательный заряд кристаллической решетки бентонита. В межслоевом пространстве присутствуют также молекулы связанной воды

[4, 5]. Нами показано, что физико-химические процессы, протекающие при синерезисе геля бентонита до полного удаления дисперсионной среды, способны дать информацию о химической активности наночастиц и реакциях в этом процессе [6, 7, 11, 13]. В гидрогеле бентонита кроме ММТ могут присутствовать примесные минералы: кварц, гипс, полевой шпат, гематит, доломит, суммарно не превышающие 30% [5]. Поэтому гель бентонита состоит из множества разнообразных сеток и агрегатов, связанных водой, скрепляя случайные контакты наночастиц. Здесь возможны химические реакции и процессы самоорганизации периодических структур, подобных полученным Лезогангом [8-10, 12]. Со временем эти сетки и агрегаты растут, в них может увеличиваться концентрация растворенных веществ до больших пересыщений, недоступных в обычных лабораторных условиях.

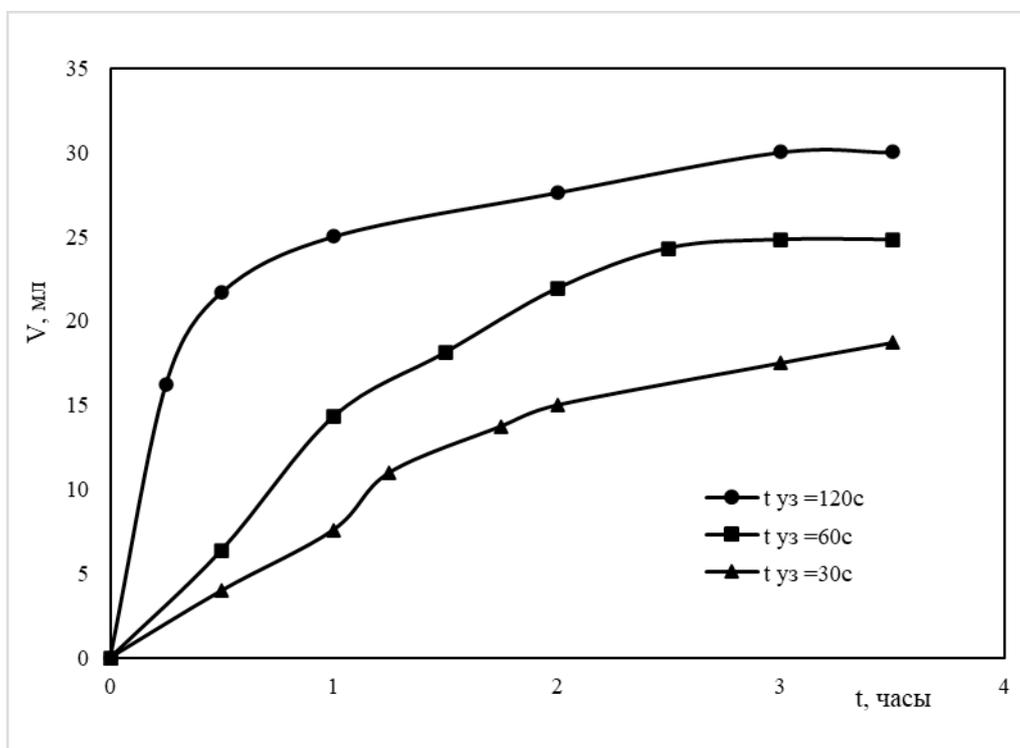
В связи с изложенным представляет интерес экспериментальное изучение процесса синерезиса с использованием бентонита различных месторождений. Нами проводились опы-

ты по изучению синерезиса с использованием бентонита ЧР.

Как указано выше, в наших опытах по изучению синерезиса использован бентонит месторождения Катаяма (ЧР). Предварительно бентонит сушили при  $120^{\circ}\text{C}$ , измельчали предварительно на шаровой мельнице РМ-100 (Германия), а затем и в дистиллированной воде под действием ультразвука. Размеры частиц бентонита после измельчения определяли анализатором субмикронных частиц HORIBA LD – 550 (Япония).

В опытах экспериментально определялась зависимость объема жидкости, которая выделялась при синерезисе, от следующих факторов: концентраций бентонита; содержания электролита KCl; продолжительности действия ультразвука. Для экспериментальных исследований были использованы ампулы объемом 40 мл. В процессе проведения опытов температура поддерживалась постоянной и равной  $23^{\circ}\text{C}$ .

В опытах использованы образцы водной суспензии тонкодисперсного бентонита, с одномодалными гистограммами, близкими к



**Рис. 1.** Влияние длительности действия ультразвука на  $V$  (объем синерезиса) при  $C_b=2\%$ ,  $KCl=3\%$ ,  $V=40\text{мл}$ ,  $t=23^{\circ}\text{C}$

симметричным, в которых моды частиц имели значения  $\sim 200$  нм и более.

Гидрогель бентонита, залитый в прозрачные ампулы, в первые минуты имеет мениск светло-серого цвета, таков и цвет боковой поверхности столбика в ампуле. Через 3-5 минут на поверхности мениска появляется прозрач-

ный слой дисперсионной среды (синергической жидкости). На боковой поверхности столбика гидрогеля в ампуле формируется слой с множеством складок различной длины и толщины. Со временем их размер и число уменьшается, а поверхность становится однородной.

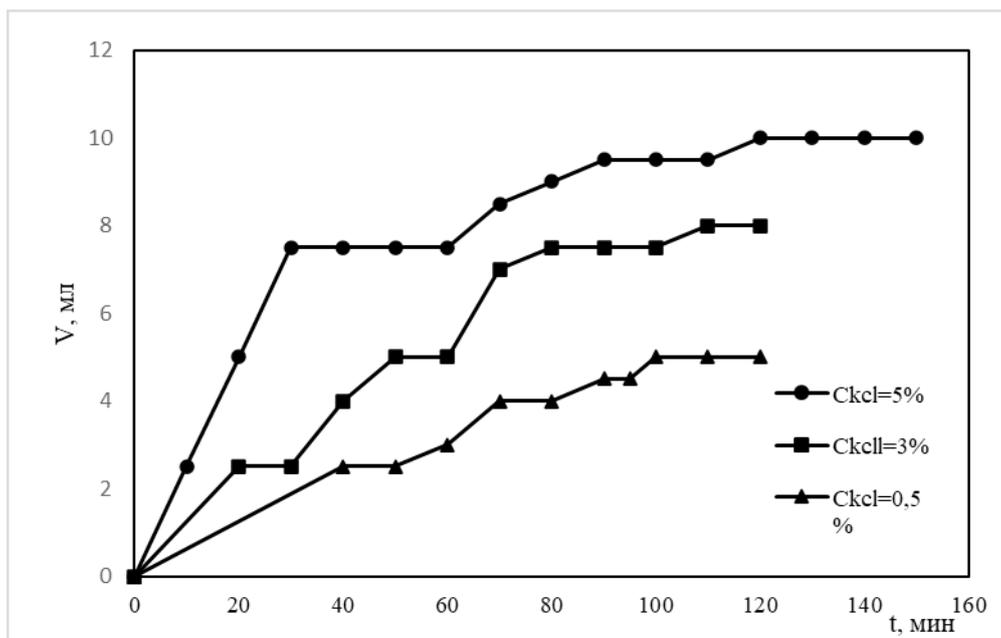


Рис. 2. Влияние KCl на V при  $C_b=2\%$ ,  $V=40$ мл,  $t_{уз}=30$ с,  $t=23^\circ\text{C}$

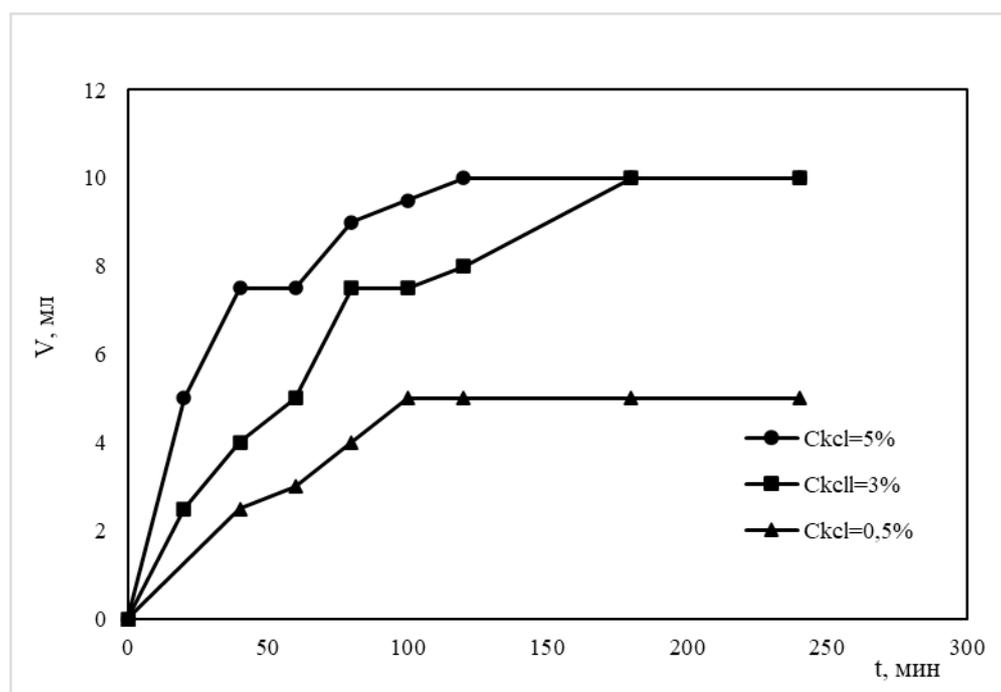


Рис. 3. Влияние KCl на V при  $C_b=2\%$ ,  $V=40$ мл,  $t_{уз}=30$ с,  $t=23^\circ\text{C}$

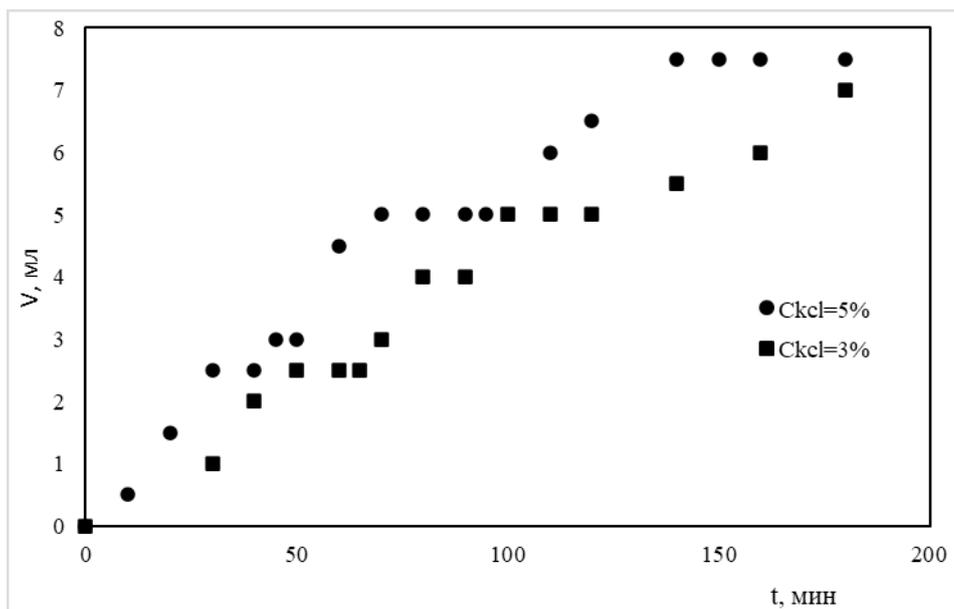


Рис. 4. Влияние KCl на V при Сб=2%, V=40мл, туз=60с, t=23° С

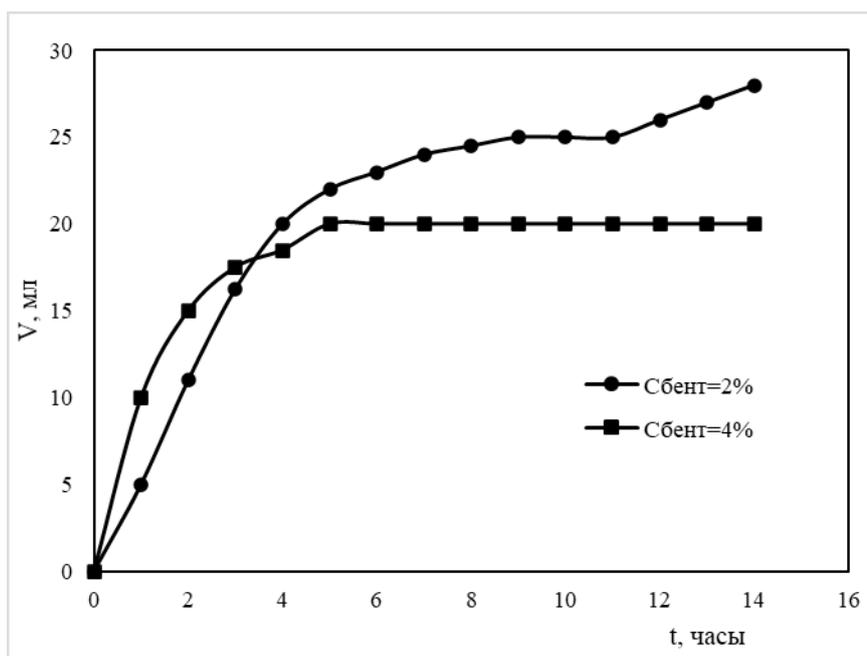


Рис. 5. Влияние Сб на V при KCl=0,5%, туз=30с, V=40 мл, t=23° С

Нами проводилось измерение объема жидкой среды, выделяющейся в результате синерезиса. Полученные данные представлены на рисунках.

На рис. 1 представлена зависимость объема синеретической жидкости от продолжительности действия ультразвука 30, 60 и 120 секунд при концентрации бентонита Сб – 2%,

KCl-3%. В опытах получены три кривые, удаленные друг от друга, что указывает на высокую чувствительность синерезиса на размер частиц бентонита.

Кривые на рис. 2-4 выражают зависимость объема выделяющейся жидкости от времени выдержки при различной концентрации электролита KCl в суспензии бентонита. Установ-

лено, что при наличии электролита синергической жидкости выделяется в три раза меньше, чем при действии ультразвука. Из рисунка 2 видно, что в зависимости от времени синергический объем увеличивается. Однако, в отличие от кривых, полученных после действия ультразвука, при наличии электролита кривая роста объема жидкости характеризуется появлением ступенек (полос). Из приведенных кривых видно, что в начале процесса синерезиса

размеры ступенек большие, а со временем они уменьшаются. Подобные полосатые кривые приведены на рис. 3 и 4. В этих опытах электролит KCl является коагулянтом, который собирает частицы геля в хлопьевидные осадки и агрегаты. При этом в опытном образце геля появляется свободная жидкость, покидающая образец, при меньшем постоянном гидравлическом сопротивлении микроскопических каналов образца геля в процессе синерезиса.

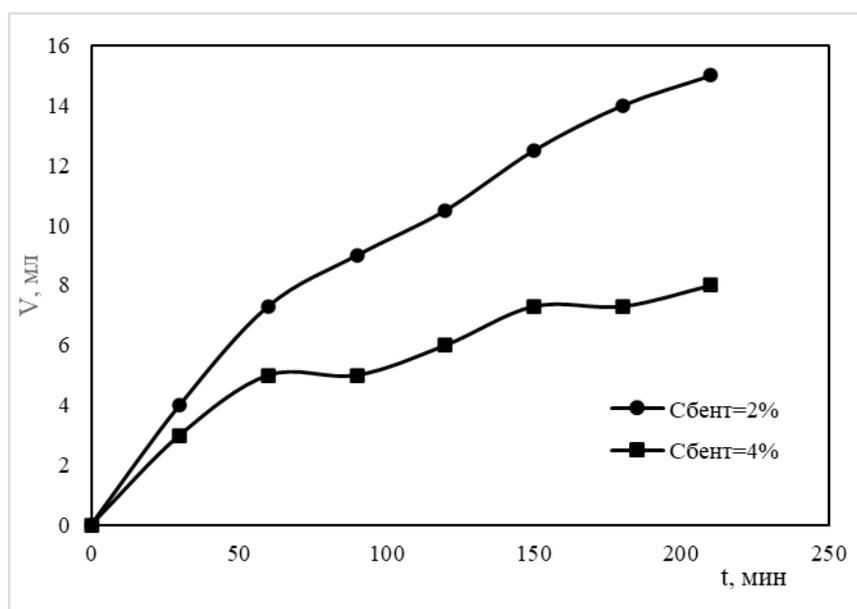


Рис. 6. Влияние Сб на V при KCl=0,5%, туз=120с, V=40 мл, t=23 °C.

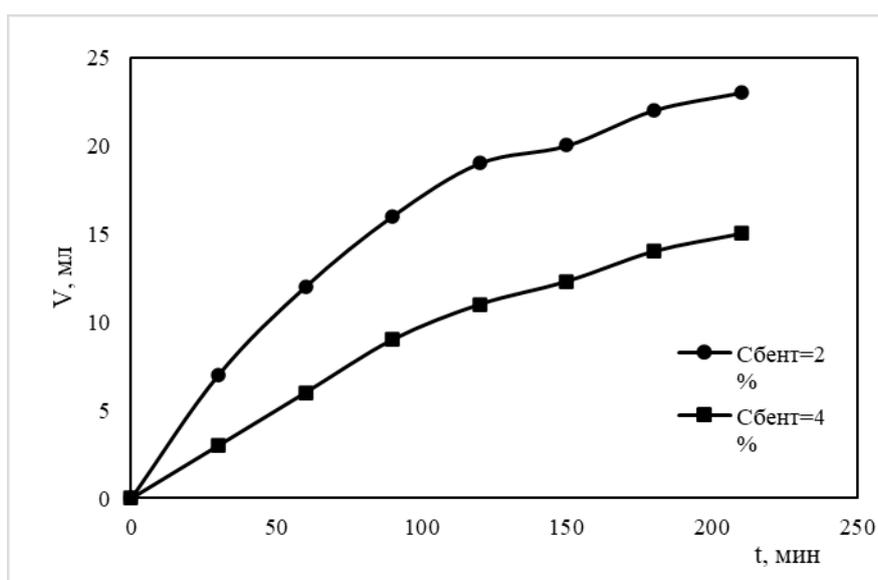


Рис. 7. Влияние Сб на V при KCl=0,5%, туз=30с, V=40мл, t=23 °C

На рисунках 5-7 представлены результаты опытов по определению зависимости синерезиса  $V$  от времени при концентрации бентонита 2 и 4%,  $KCl=0,5\%$ ,  $\tau_{уз}=30$ с и 120с. Из приведённого следует, что на всех рисунках кривые, соответствующие меньшим концентрациям бентонита, расположились выше. Это условие сохраняется и для рис. 6, где участвует в опыте бентонит, измельченный ультразвуком в течение 120с. Однако кривая рис. 6, характерная для 4% образца бентонита, имеет два участка, напоминающие полосы постоянных значений  $V$  на участках 50-100 и 150-200 минут.

Каждая точка на наших графиках соответствует объёму синеретической жидкости, которая выделилась из геля исследуемого образца за указанное время. На графиках длина ступеней (полос постоянных значений  $V$ ) сокращается по мере выделения синеретической жидкости и

может исчезнуть. Кроме этого сокращается удаленность ступеней друг от друга в зависимости от продолжительности эксперимента. Эти обстоятельства указывают на то, что гидравлическое сопротивление геля может зависеть от давления свободной жидкости и упругих свойств микроскопических каналов в геле.

Таким образом, установлено, что добавление в гидрогель коагулянта  $KCl$  повышает синерезис и формирует ступенчатые графики в виде горизонтальных полос постоянных значений объёма синеретической жидкости. Длина полос сокращается к концу опыта. Измельчение частиц гидрогеля бентонита действием ультразвука приводит к значительному увеличению синеретической жидкости геля. Установлено, что бентонит ЧР относится к группе коллоидов, понижающих синеретическую жидкость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ершов Ю. А.* Коллоидная химия. Физическая химия дисперсных систем. М.: «ГЭОТАР-Медиа», 2012. С. 351.
2. *Большова Е. В.* Изучение синерезиса гидроколлоидов, используемых в технологии мясопродуктов: Дис. ... канд. тех. наук. 2011. С. 154.
3. *Зимон А. Д., Павлов А. Н.* Коллоидная химия наночастиц. Москва: Научный мир, 2012. С. 218.
4. *Сергеев Г. Б.* Нанохимия. М.: Изд-во Мос. ун-та, 2007. С. 334.
5. *Белосов П. Е., Бочарникова Ю. И., Боева Н. М.* Аналитические методы диагностики минерального состава бентонитовых глин // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2015. №4.
6. *Межидов В. Х., Дадашев Р. Х., Гацаев З. Ш., Гайрабеков И. Г.* Влияние углекислого газа на свойства бентонита в водной суспензии // Advances in engineering research. 2018. Pp. 307-310. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37194719/>
7. *Межидов В. Х., Дадашев Р. Х., Гацаев З. Ш., Дадашева З. И., Талхигова З. И.* Влияние углекислого газа на коллоидные свойства суспензий бентонита // Advances in engineering research. 2019. Pp. 452-457.
8. *Жиленко М. П., Папина Ю. Е., Руденко А. П.* Влияние сорбции ионов  $Ni(II)$  на синерезис и щелочной гидролиз набухших полиакриламидных гидрогелей // Вестник. Моск. ун-та. Сер. 2, химия. 2000. Т. 41. № 1. С. 48-52.
9. *Головин Ю. И., Шибков А. А., Желтов М. А., Королев А. А., Маеров А. В.* Электромагнитная и акустическая эмиссия при взрывной кристаллизации переохлажденной капли воды // Конденсированные среды и межфазные границы. Том 1. №4. С. 304-307.
10. *Покидько Б. В., Плетнев М. Ю., Мельникова М. М.* Влияние электролита на процесс структурообразования в водных дисперсиях Na-монтмориллонита таганского месторождения // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6. №6. С. 113-119.
11. *Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Нахаев М. Р.* Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
12. *Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш., Сайдумов М. С., Исмаилова З. Х.* Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок // Научный журнал «Современная наука и инновации». 2017. №2 (18). С. 168-175.

13. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. № 2 (Т. 46). С. 65-70.

## PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES DURING THE SYNERESIS OF BENTONITE HYDROGEL

© V.Kh. Mezhidov<sup>1</sup>, R.Kh. Dadashev<sup>1</sup>, Z.Sh. Gatsaev<sup>1</sup>, N.A. Galanina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov*

<sup>2</sup>*MRI, Moscow, Russia*

The structure, composition and properties of bentonite depend on the deposit. We have carried out experimental studies of syneresis using ChR bentonite. In experiments, the volume of syneretic fluid that was released during syneresis was experimentally determined, depending on the following factors: bentonite concentrations; electrolyte content KCl; the duration of the ultrasound. As a result of the experiments, it was found that CR bentonite belongs to the group of colloids that reduce the syneretic fluid. The grinding of bentonite particles under the action of ultrasound leads to a significant increase in the volume of the syneretic liquid. The addition of KCl electrolyte to the hydrogel increases syneresis and forms stepped graphs, where the growth of the syneretic fluid volume stops for 30 minutes or less, forming horizontal sections. An increase in the concentration of KS1 increases (and vice versa) the length of the bands (steps) of the same values of the volumes of the syneretic fluid. We explain the appearance of steps by the coagulation properties of KS1, which combines dispersed particles into aggregates and flakes. In this case, a free liquid phase appears in the gel, leaving the sample at a lower hydraulic resistance of microscopic channels in the sample.

**Keywords:** bentonite, suspensions, gel, syneresis, syneretic fluid.

### REFERENCES

1. Ershov, Yu. A. (2012) Kolloidnaya khimiya. Fizicheskaya khimiya dispersnykh sistem. [Colloidal chemistry. Physical chemistry of disperse systems]. M.: "GEOTAR-Media". P. 351.
2. Bolshova, E. V. (2011) Izuchenie sinerezisa gidrokolloidov, ispol'zuemykh v tekhnologii myasoproduktov. Dis. k. t. n. [The study of syneresis of hydrocolloids used in the technology of meat products. Abstract of the Ph. D. thesis.]. P. 154.
3. Zimon, A. D. and Pavlov, A. N. (2012) Colloidal chemistry of nanoparticles. [Colloidal chemistry of nanoparticles]. Moscow Scientific world. P. 218.
4. Sergeev, G. B. (2007) Nanokhimiya [Nanotechnology]. Publishing house Mos. University. P. 33
5. Belousov, P. E., Bocharnikova, Yu. I. and Boeva, N. M. (2015) 'Vliyanie uglekislogo gaza na svoistva bentonita v vodnoi suspenzii'. [Analytical methods for diagnosing the mineral composition of bentonite clays]. *Bulletin of RUDN University*, Engineering Research series, №4.
6. Mezhidov, V. Kh., Dadashev, R. Kh., Gatsaev, Z. Sh and Gairabekov, I. G. (2018) Vliyanie uglekislogo gaza na svoistva bentonita v vodnoi suspenzii. [Effect of carbon dioxide on the properties of bentonite in aqueous suspension]. *Advances in engineering research*. Pp. 307-310.

7. Mezhidov V.Kh., Dadashev R.Kh., Gatsaev Z.Sh., Dadasheva Z.I. and Talkhigova Z.I. (2019) Vliyanie uglekislogo gaza na kolloidnye svoistva suspenzii bentonita. [Effect of carbon dioxide on the colloidal properties of bentonite suspensions]. *Advances in engineering research*. Pp. 452-457.
8. Zhilenko, M. P. Papin, Yu. E. Rudenko, A. P. (2000) 'Vliyanie sorbtsii ionov Ni (II) na sinerezis i shchelochnoi gidroliz nabukhshikh poliakrilamidnykh gidrogelei'. [Effect of Ni (II) ion sorption on syneresis and alkaline hydrolysis of swollen polyacrylamide hydrogels]. *Vestnik.mosk. university*. Ser. 2. Chemistry. V. 41. № 1. Pp. 48-52.
9. Golovin, Yu. I., Shibkov, A. A., Zheltov, M. A., Korolev, A. A. and Maerov, A. V. 'Elektromagnitnaya i akusticheskaya emissiya pri vzryvnoi kristallizatsii, pereokhlazhdennoi kapli vody'. [Electromagnetic and acoustic emission during explosive crystallization of a supercooled water drop]. *Condensed media and interfaces*. Volume 1. №4. Pp. 304-307.
10. Pokidko, B. V., Pletnev, M. Yu. and Melnikova, M. M. (2011) 'Vliyanie elektrolita na protsess strukturoobrazovaniya v vodnykh dispersiyakh Na-montmorillonita taganskogo mestorozhdeniya'. [Influence of electrolyte on the process of structure formation in aqueous dispersions of Na-montmorillonite of the Tagansky deposit]. *Vestnik MITHT*, V. 6. №6. P. 113-119.
11. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Nakhaev, M. R. (2020) 'Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v tsementnoi industri'i'. [Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry]. *Construction materials*. № 1-2. Pp. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
12. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh., Saidumov, M. S. and Ismailova, Z. Kh. (2017) Vliyanie aktivnykh tsentrov poverkhnosti na reaktivnost' mineral'nykh dobavok [Influence of surface active centers on the reactivity of mineral additives]. *Scientific journal "Modern Science and Innovations"*. №2 (18). Pp. 168-175.
13. Murtazaev, S-A. Yu. and Salamanova, M. Sh. (2018) 'Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoi prirody'. [Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature]. *Privolzhsky scientific journal*. №2 (V. 46). Pp. 65-70.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ ДИФФУЗИОННОЕ ПОКРЫТИЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

© А. С. Нурадинов, Н. С. Уздиева, С. С.-С. Ахтаев, М. Р. Исаева  
ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Россия, Грозный

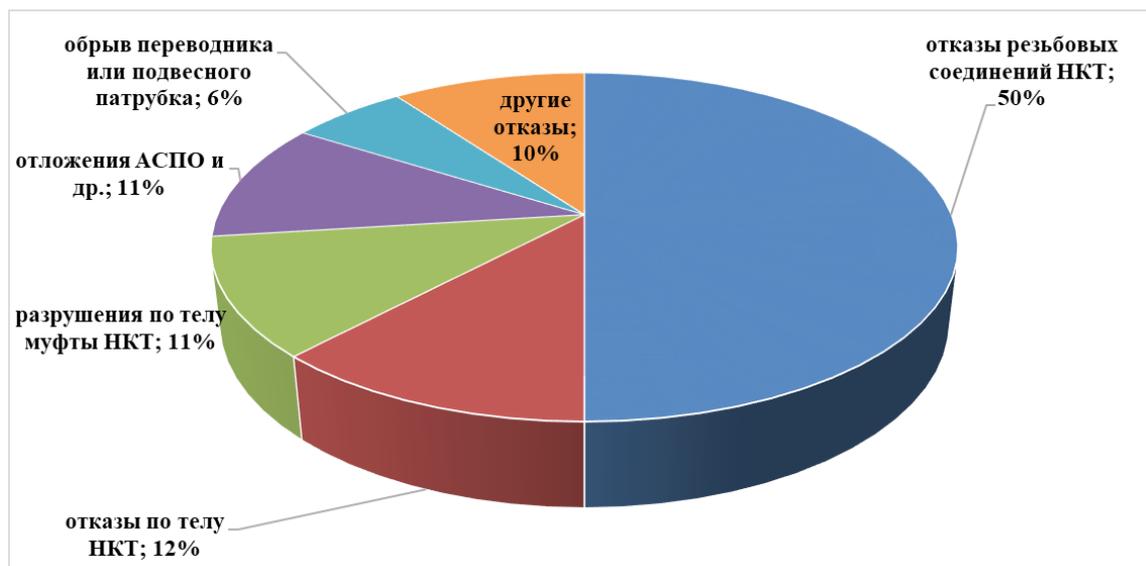
В работе рассмотрена усовершенствованная технология нанесения на насосно-компрессорные трубы (НКТ), в том числе и на резьбовые соединения, диффузионного железоцинкового покрытия нового поколения с высокими показателями по коррозионностойкости и износостойкости. Комплексными исследованиями образцов оцинкованных НКТ подтверждены их высокие качественные характеристики и соответствие стандартным требованиям для различных условий эксплуатации. Авторами подготовлен проект технологической инструкции по интерметаллидному диффузионному цинкованию НКТ, составлен перечень необходимого оборудования для нанесения диффузионного цинкового покрытия на насосно-компрессорные трубы. Разработаны рекомендации по применению НКТ с диффузионным железоцинковым покрытием на предприятиях нефтегазодобывающего комплекса Чеченской Республики и РФ.

**Ключевые слова:** углеводороды, НКТ, защитное диффузионное железоцинковое покрытие, износостойкость, коррозионностойкость, физико-химические свойства, стойкость к сероводородному растрескиванию.

Технология добычи углеводородного сырья в процессе разработки нефтяных, газоконденсатных и газовых месторождений предусматривает применение насосно-компрессорных труб для извлечения пластовых флюидов и нагнетания подтоварной воды с целью утилизации, применение различных растворов, содержащих агрессивные химические реагенты, и газов при капитальном и текущем ремонте скважин и др. В ходе эксплуатации скважин лифтовые трубы подвергаются воздействию коррозионно-агрессивных сред, содержащих в том или ином количестве минеральные соли, в том числе хлориды, сульфаты, карбонаты, уголекислоту, сероводород, абразивные компоненты [1]. Все эти факторы наряду с кислотными обработками, используемые при бурении, эксплуатации и обслуживании объектов добычи нефти и газа, обуславливают ускоренный износ труб. Анализ причин разрушения труб показывает, что в 70-75% случаев это коррозия, причем в наибольшей степени коррозионным повреждениям подвергается внутренняя поверхность труб, по которым перекачивается пластовая вода или обводненные нефть и газ [2].

Если говорить конкретно о насосно-компрессорных трубах (НКТ), то наиболее распространенными причинами аварий являются коррозия, коррозионный износ и снижение качества герметичности соединений в резьбе трубы, усталостные разрушения и другие. Результаты исследований Американского нефтяного института (API) показали, что более 50% аварий в насосно-компрессорных трубах обусловлены разрушениями, происходящими в резьбе НКТ (рис. 1) [3]. Для повышения прочности НКТ используют стали с повышенным содержанием марганца (типа 36Г2С и др.) [4]. Марганец увеличивает ликвационную неоднородность стали, способствует образованию сульфидов в ее структуре, а на поверхности труб – рыхлых продуктов коррозии со слабой адгезией, повышенной пористостью, которые легко отслаиваются от поверхности. При этом образуются гальвано-параметалл-продукты коррозии и, как следствие, язвенная коррозия.

Применение в последние годы интенсивных методов отборов нефти и газа приводит к дальнейшему повышению жесткости условий использования скважинного оборудования, к числу которых относятся лифтовые трубы в



**Рис. 1.** Основные виды отказов НКТ в процессе их эксплуатации

скважинах. Экстремальными случаями коррозионных повреждений НКТ являются так называемые «полеты» глубинно-насосного оборудования, приводящие к потере скважин и экологическим катастрофам, связанные с разливом в больших объемах углеводородов и высокоминерализованных пластовых флюидов [5].

Мировой опыт показывает, что одним из эффективных и экономически обоснованных путей решения проблемы увеличения стойкости к коррозии и повышения срока службы НКТ является использование защитных покрытий. Вместе с тем, на сегодняшний день заводы России, производящие трубную продукцию, не производят насосно-компрессорные трубы с покрытиями для их надежной защиты. В основном используется цинкование резьбы в муфтовых соединениях труб гальваническим методом, или же фосфатируют.

Ведущие мировые компании, производящие трубную продукцию, изготавливают насосно-компрессорные трубы различных видов. Среди основных можно выделить трубы из стеклопластика, трубы с покрытиями из эпоксиды или силикато-эмали, а также с диффузионно-цинковым покрытием. При этом недостатки первых видов НКТ обусловлены тем, что и полимерами, и силикато-эмалями покрывают только внутреннюю часть насосно-ком-

прессорных труб. В то же время резьбовая часть труб, которая подвергается максимальным жестким воздействиям в ходе эксплуатации, оказывается без защиты.

Отсутствие износостойкого и коррозионностойкого покрытия на резьбах труб и муфтовых соединений не обеспечивает эффективной защиты НКТ в жестких условиях эксплуатации [6].

Авторы работ [7-11] в своих исследованиях подчеркивают, что из перечисленных выше основных защитных покрытий, используемых ведущими мировыми производителями труб, наилучшие практические результаты приходятся на диффузионно-цинковые покрытия.

В зависимости от «механизма производства и физико-химических показателей» защитные покрытия оцинкованных труб дифференцируют на гальванические, металлизационные, цинконаполненные, горячецинковые, диффузионно-цинковые и комбинированные группы [3]. При этом следует подчеркнуть значительную разницу в защитных свойствах данных покрытий.

В справочнике Е.В. Проскуркина «Диффузионные цинковые покрытия: свойства, области применения» отмечается, что у защитного железоцинкового покрытия стойкость коррозии значительно выше, чем у чистого цинка. Это объясняется тем, что в пассивации

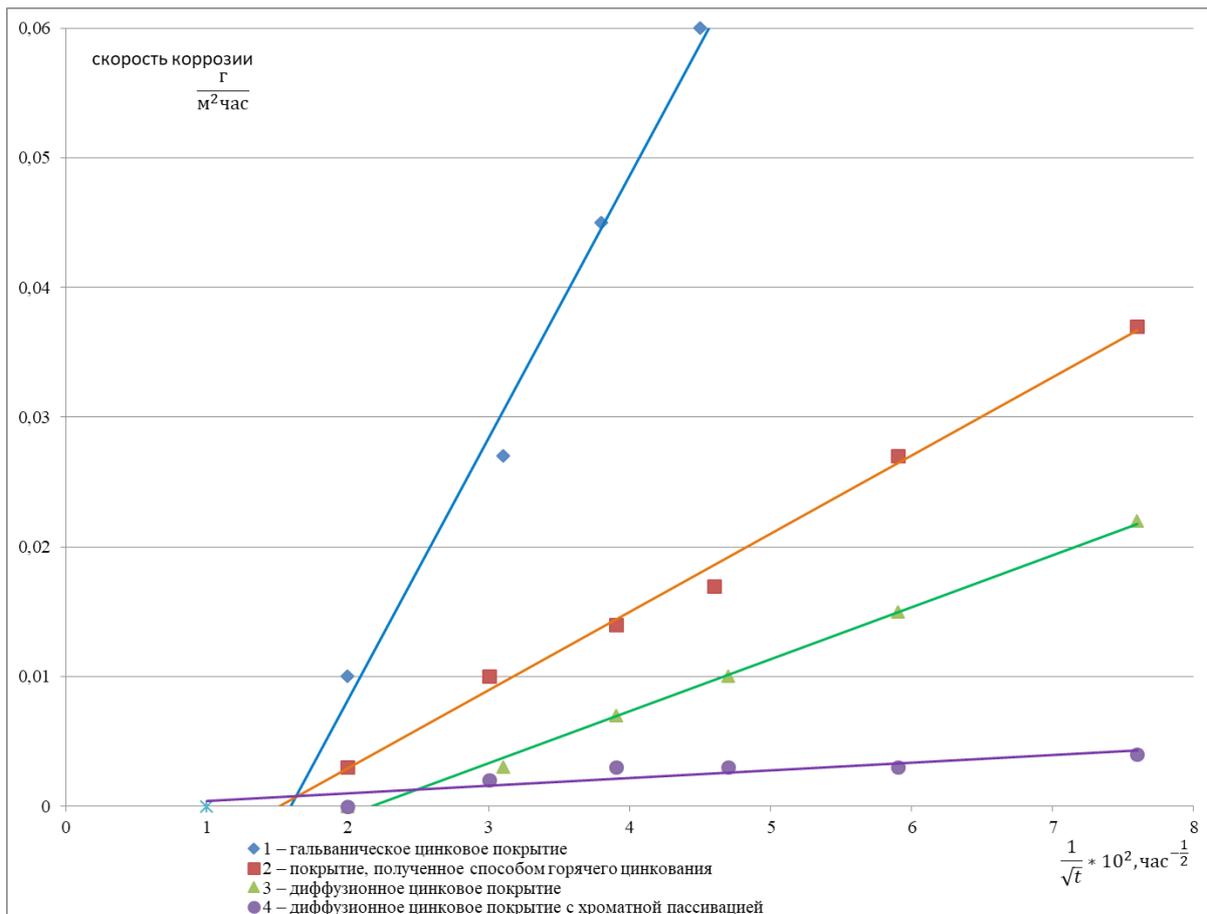


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии труб от способа цинкования

покрытия участвуют как оксиды цинка, так и ферриты цинка. Этот вывод хорошо подтверждается результатами сравнительных исследований, проведенных при взаимодействии хлорированной воды с разными покрытиями (гальванические, горячецинковые и диффузионно-цинковые) (рис. 2). Как видно из рис. 2, скорость коррозии обратно пропорциональна квадратному корню времени выдержки, и минимальной скоростью коррозии обладает диффузионное цинковое покрытие (кривые 3 и 4), что свидетельствует о перспективности использования таких покрытий.

Поэтому при разработке защитного покрытия из цинка и выборе технологического процесса покрытия НКТ предпочтение было отдано процессу диффузионного цинкования. Защитное покрытие труб, находящихся под воздействием жестких коррозионных и эрозийных сред в процессе нефтегазодобычи, наряду с высокими антикоррозионными свой-

ствами должно обладать и стойкостью против абразивного износа, а также характеризоваться высокой прочностью сцепления с площадью защищаемой поверхности НКТ.

В связи с этим в работе решалась задача разработки защитного железозинкового покрытия нового поколения (заданной микроструктуры и химического состава) на поверхности насосно-компрессорных труб с высоким комплексом свойств и технологии его диффузионного нанесения. Сущность решаемой задачи заключалась в выборе научно обоснованного оптимального состава насыщающей диффузионной смеси и технологических режимов диффузионного цинкования (температуры и времени выдержки). При этом необходимо было обеспечить получение на всей поверхности труб, в том числе на их нарезных концах, равномерного защитного покрытия (интерметаллидные фазы) заданной толщины с высокими показателями физико-химических свойств.

В настоящее время при осуществлении диффузионного цинкового покрытия используют следующие типы порошков:

- смесь цинкового порошка с инертными материалами, такими как кварцевый песок, оксид алюминия и др.;

- смесь цинкового порошка с активаторами ( $\text{NHCl}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{NaF}$  и др.);

- комбинированные порошки, которые содержат как основные, так и инертные материалы, различные активаторы и добавки (алюминиевый порошок,  $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_6\text{S}$ ,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и др.).

Инертные добавки, или так называемые разбавители, позволяют увеличить температуру диффузионного цинкования сверх температуры плавления цинка, что, в свою очередь, позволяет защититься от сплавления и спекания цинкового порошка и уйти от процесса налипания его на поверхность цинкуемого изделия. А использование порошковых смесей с активаторами ускоряет процесс диффузионного цинкования и позволяет проводить его при более низких температурах (300–400°C).

В работе проводились исследования с целью интенсификации процесса насыщения и повышения защитных свойств покрытия, т.е. создания комбинированных порошковых смесей. Оптимальные результаты были получены при использовании смеси следующего состава:

кварцевый песок,	массовый %	55-75
цинковый порошок,	массовый %	25-45
аммоний хлористый,	массовый %	5.

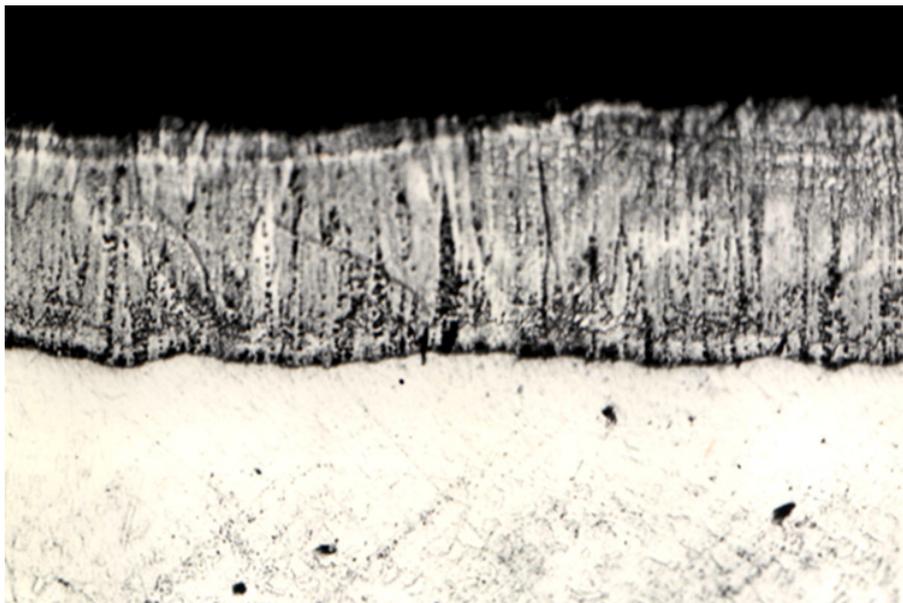
Для разработки научно обоснованных технологических рекомендаций по диффузионной металллизации НКТ в лабораторных условиях были изготовлены опытные образцы диффузионно оцинкованных насосно-компрессорных труб из высокопрочной стали марки 36Г2С при различных температурно-временных параметрах (рис. 3).

В результате на поверхности труб образуется покрытие, которое состоит из железоцинкового сплава, определенного химического и структурного состава. Основные факторы, определяющие глубину его проникновения в поверхностные слои металла труб и муфт, это продолжительность диффузионного процесса и температура. При этом покрытие хорошо сцеплено с основным металлом, имеет равномерную толщину и плотную микроструктуру. Толщина железоцинкового покрытия в зависимости от температурно-временных параметров составила на гладкой части труб 43-78 мкм, на резьбовой части – 25-35 мкм.

Микроскопическое исследование структуры железоцинкового покрытия показало, что оно состоит из следующих фаз –  $\gamma$ -фаза и  $\delta$ -фаза (рис. 4).  $\gamma$ -фаза – это тонкий переходный слой мощностью 2-4 мкм, находящийся на поверхности стального тела трубы и содержащий до 30% железа. Непосредственно к ней примыкает  $\delta$ -фаза, представляющая собой интерметаллидное соединение столбчатой структуры, в составе которой от 7 до 12% железа.



Рис. 3. Резьбовое соединение НКТ после диффузионного оцинкования



**Рис. 4.** Микроструктура диффузионного железозинкового покрытия на НКТ

Визуальный осмотр резьбовых соединений муфт и nipple-концов НКТ до и после испытаний на абразивный износ при операциях свинчивания-развинчивания показал, что после 30 операций ни сплюсываний и ни задиров на поверхности резьб не обнаружено, то есть в процессе испытания диффузионно-цинковое покрытие осталось неповрежденным. Анализ результатов металлографического исследования подтвердил данные, полученные в ходе визуального и микроскопического наблюдений.

Из опыта известно, что насосно-компрессорные трубы без покрытий могут выдержать не более 7 операций свинчивания-развинчивания, что подтверждает высокую надежность диффузионно оцинкованных труб в условиях эксплуатации.

Одним из важнейших качественных показателей диффузионных цинковых покрытий является микротвердость, поскольку она в значительной степени характеризует характеристики насосно-компрессорных труб в процессе их эксплуатации в агрессивных средах, содержащих как механические примеси, так и сероводород.

Результаты измерений микротвердости по сечению диффузионно оцинкованных НКТ (Æ73'5,5 мм групп прочности Д и Е) до и по-

сле проведения коррозионных испытаний в течение 98 часов в среде, содержащей сероводород, с использованием методики NACE TM 0284 (состав среды: 5% NaCl, 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, 3000 мг/л H<sub>2</sub>S, pH = 3-4) приведены в табл. 1. Из этих результатов видим, что на поверхности НКТ образуется качественный слой защитного диффузионного железозинкового покрытия однородной толщины, в том числе на резьбовых участках труб и муфт, который сохраняет высокую твердость и, соответственно, износостойкость даже после коррозионных испытаний (табл. 1).

Кроме коррозионной устойчивости диффузионно оцинкованные НКТ испытаны на стойкость к сероводородному растрескиванию с применением методики NACE TM 0177, которые показали, что диффузионное цинкование усиливает стойкость насосно-компрессорных к сероводородному растрескиванию под напряжением. В ходе испытаний во внутреннюю часть образцов свинченных НКТ («труба-муфта-труба») общей длиной 700 мм подавали под давлением 30 Мпа агрессивную среду с содержанием сероводорода.

В ходе 720-часового эксперимента (базовое время) не было отмечено ни разрушение, ни потеря герметичности исследуемых образцов НКТ. То есть в течение регламентиро-

ванного времени рассматриваемое защитное диффузионное железоцинковое покрытие обусловило сохранение герметичности резьбовых соединений труб.

Указанное покрытие сохраняет высокие механические свойства даже после длитель-

ных коррозионных испытаний в средах, содержащих хлориды и сероводород (рис. 5).

По результатам испытаний образцов диффузионно оцинкованных НКТ на стойкость против коррозионного воздействия сероводородсодержащих сред можно сделать вывод, в

Таблица 1.

Микротвердость диффузионно оцинкованных НКТ по сечению

Группа прочности	Зона определения микротвердости	Микротвердость, МПа	
		до коррозионных испытаний	после коррозионных испытаний
Д	ДЦП	3707	4070
		3707	3942
		4070	3942
	Стальная основа	3295	3295
		3158	3030
		3138	2971
Е	ДЦП	4099	4168
		4197	4795
		4482	4482
	Стальная основа	3295	3295
		3295	3109
		3236	3079

Примечание: ДЦП – диффузионно-цинковое покрытие.

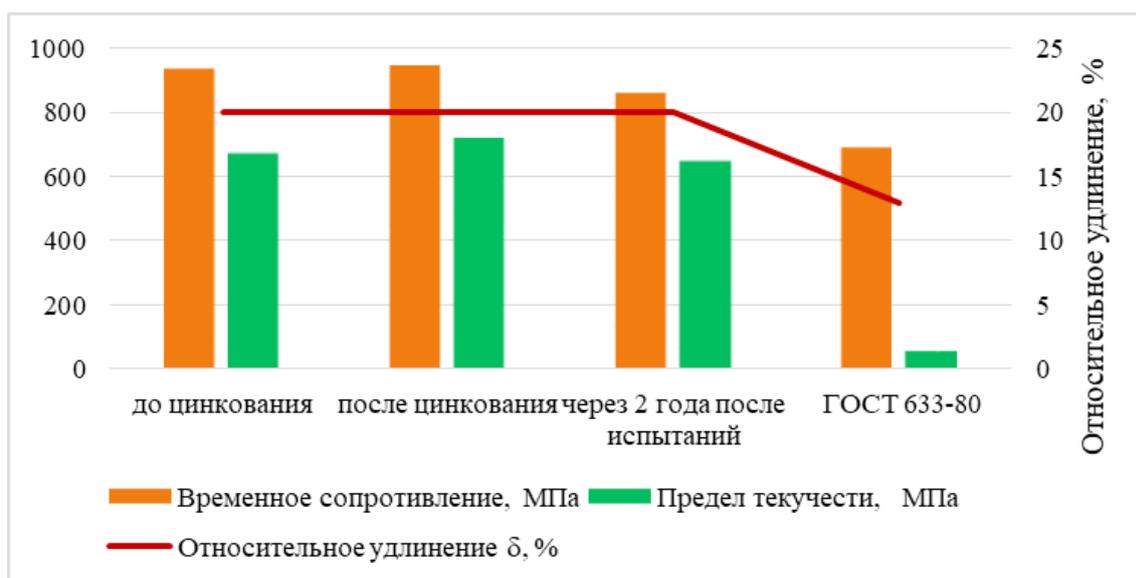


Рис. 5. Свойства насосно-компрессорных труб диаметром 73 мм (Е) до и после цинкования

том числе, о возможности их использования на нефтяных и газовых месторождениях, содержащих сероводород.

Таким образом, в результате лабораторных исследований разработано защитное покрытие нового поколения и научно обоснованные технологические режимы его нанесения на поверхность НКТ, которые обеспечивают получение на их поверхностях и резьбовых соединениях железцинкового покрытия с регламентированной микроструктурой, содержащей коррозионностойкую, износостойкую и прочную железцинковую интерметаллидную  $\delta$ -фазу.

Несмотря на высокую энергоемкость диффузионной металлизации, выбор этого способа получения коррозионностойкого и износостойкого железцинкового покрытия основывается

на том, что при этом обеспечивается высокая прочность связи покрытия с поверхностью трубы в результате внедрения атомов наносимого на поверхность элемента в кристаллическую решетку защищаемого металла. В результате образующаяся интерметаллидная  $\delta$ -фаза железцинкового покрытия имеет высокий уровень физико-химических и механических свойств. При эксплуатации труб с таким покрытием при повышенных температурах и давлениях в агрессивных нефтепромысловых средах (сероводород, уголекислота и др.) на поверхности НКТ появляются вследствие коррозии крепкие слои, характеризующиеся защитными свойствами. Вследствие барьерного эффекта продуктов коррозии (эффект самозащиты) эти слои защищают нижележащую поверхность труб от последующего разрушения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саакян Л. С., Ефремов А. П. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. М.: Недра, 1982. 231 с.
2. Федоров А. В., Осанов К. К., Ломаев Е. Н., Алешков А. М., Минцаев М. Ш. Анализ статистики и причинно-следственных связей аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности России и Казахстана // Технологии техносферной безопасности. 2021. №2 (92). С. 156-168.
3. Проскуркин Е. В., Поликарпов М. П., Петров И. В. и др. Диффузионные цинковые покрытия для защиты труб и других металлоизделий // Сталь. 2016. №4. С. 31-34.
4. Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С., Исаева М. Р. Моделирование процесса валковой разливки-прокатки металлов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №3 (25). С. 25-32.
5. Нурадинов А. С., Уздиева Н. С. Способ повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности насосно-компрессорных труб // «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в 2-х частях. 2020. С. 444-451.
6. Proskurkin E. V., Gorbunov N. S. Galvanizing Sherardizing and other zinc diffusion coatings. London: Technicopy Ltd. Publishing House and Zinc development association, 1975. 261 p.
7. Завьялов В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. М.: Недра, 2005. 331 с.
8. Маркин Н. М. О механизме уголекислотной коррозии стали // Защита металлов. 1996. Т. 32. №5. С. 497-503.
9. Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С., Эльмурзаев А. А., Нурадинов А. С. Влияние теплофизических условий затвердевания стальных слитков на их химическую неоднородность // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №1 (23). С. 26-37.
10. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Сравнительный анализ диффузионных цинковых покрытий и их коррозионной стойкости в системах горячего водоснабжения // Коррозия: Материалы, защита. 2008. №4. С. 26-32.
11. Тарамов Ю. Х., Ахьядов Р. И., Эльмурзаев А. А. Производство водорода электролизом воды из полимерной электролитной мембраны (ПЭМ) // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №4 (26). С. 33-37.

## ADVANCED DIFFUSION COATING PUMPING AND COMPRESSOR PIPES

© A. S. Nuradinov, N. S. Uzdieva, S. S-S. Akhtaev, M. R. Isaeva

*GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia*

The paper considers an improved technology for applying a new generation diffusion iron-zinc coating with high corrosion resistance and wear resistance to pumping and compressor pipes (TUBING), including threaded connections. Comprehensive studies of galvanized tubing samples have confirmed their high quality characteristics and compliance with today's requirements for various operating conditions. The authors have prepared a draft of technological instructions for intermetallic diffusion galvanizing of tubing, compiled a list of necessary equipment for applying diffusion zinc coating to pumping and compressor pipes. Recommendations have been developed for the use of tubing with diffusion iron-zinc coating at oil and gas production enterprises of the Chechen Republic and the Russian Federation.

**Keywords:** Hydrocarbons, tubing, protective diffusion iron-zinc coating, wear resistance, corrosion resistance, physico-chemical properties, resistance to hydrogen sulfide cracking.

### REFERENCES

1. Saakiyan, L. S. and Efremov, A. P. (1982) Zashchita neftegazopromyslovogo oborudovaniya ot korrozii. [Protection of oil and gas equipment against corrosion]. M.: Nedra. P. 231.
2. Fedorov, A. V., Ospanov, K. K., Lomaev, E. N., Aleshkov, A. M. and Mintsae, M. Sh. (2021) Analiz statistiki i prichinno-sledstvennykh svyazei avarii na ob'ektakh neftepererabatyvayushchei i neftekhimicheskoi promyshlennosti Rossii i Kazakhstana. Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti. [Analysis of statistics and cause-and-effect relationships of accidents at the facilities of the oil refining and petrochemical industries in Russia and Kazakhstan]. Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti. №2 (92). Pp. 156-168.
3. Proskurkin, E. V., Polikarpov, M. P. and Petrov, I. V. (2016) Diffuzionnye tsinkovye pokrytiya dlya zashchity trub i drugikh metalloizdelii. [Diffusion zinc coatings for the protection of pipes and other metal products]. Steel. №4. Pp. 31-34.
4. Nuradinov, A. S., Uzdieva, N. S., Akhtaev, S. S. S. and Isaeva, M. R. (2021) Modelirovanie protsessa valkovoi razlivki-prokatki metallov. [Modeling of the process of roll casting-rolling of metals. Herald of GSTOU. Engineering sciences]. Vol. 17. №3 (25). Pp. 25-32.
5. Nuradinov, A. S. and Uzdieva, N. S. (2020) Sposob povysheniya korroziionnoi stoikosti i ekspluatatsionnoi nadezhnosti nasosno-kompressornykh trub. «Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza» [Method for improving corrosion resistance and operational reliability of tubing. «Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus»]. Collective monograph based on the materials of the X All-Russian Scientific and Technical Conference in 2 parts. Pp. 444-451.
6. Proskurkin, E. V. and Gorbunov N. S. (1975) Galvanizing Sherardizing and other zinc diffusion coatings. London: Technicopy Ltd. Publishing House and Zinc development association. P. 261.
7. Zavyalov, V. V. (2005) Problemy ekspluatatsionnoi nadezhnosti truboprovodov na pozdnei stadii razrabotki mestorozhdenii. [Problems of operational reliability of pipelines at a late stage of field development]. M.: Nedra. P. 331.
8. Markin, N. M. (1996) O mekhanizme uglekislotnoi korrozii stali. Zashchita metallov. [On the mechanism of carbon dioxide corrosion of steel. Protection of metals]. V. 32. №5. Pp. 497-503.
9. Uzdieva, N. S., Akhtaev, S. S.-S., Elmurzaev, A. A. and Nuradinov, A. S. (2021) Vliyanie teplofizicheskikh uslovii zatverdevaniya stal'nykh slitkov na ikh khimicheskuyu neodnorodnost'. [Influence of thermophysical conditions of solidification of steel ingots on their chemical inhomogeneity]. Herald of GSTOU. Engineering sciences. V. 17. №1 (23). Pp. 26-37.

10. Proskurkin E.V. and Sukhomlin D.A. (2008) Sravnitel'nyi analiz diffuzionnykh tsinkovykh pokrytii i ikh korrozionnoi stoikosti v sistemakh goryachego vodosnabzheniya. [Comparative analysis of diffusion zinc coatings and their corrosion resistance in hot water supply systems]. Corrosion: Materials, protection. №4. Pp. 26-32.
11. Taramov, Yu. Kh., Akhyadov, R. I. and Elmurzaev, A. A. (2021) 'Proizvodstvo vodoroda elektrolizom vody iz polimernoi elektrolitnoi membrany (PEM)'. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Production of hydrogen by electrolysis of water from a polymer electrolyte membrane (PEM). Ythald of GSTOU. Technical sciences.], V. 17. №4 (26). Pp. 33-37.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ ООО «АФИПСКИЙ НПЗ» НА АППАРАТЕ ПОЛНОЙ РАЗГОНКИ НЕФТИ

© А. В. Сидоров, Ю. П. Ясьян

*КГТУ, Краснодар, Россия*

В данной работе проведен анализ нефтяного сырья ООО «Афипский НПЗ», кратко рассмотрены современные методы исследований нефти. Приведены результаты качественного определения узких дистиллятных фракций. Расчетные математические модели современных технологических объектов глубокой переработки нефти позволят определить технологические параметры для увеличения глубины переработки результатов.

**Ключевые слова:** исследование, нефть, фракционный состав, система моделирования, химический состав

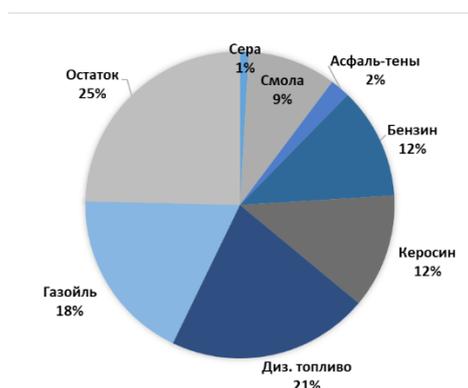
В последнее время для специалистов нефтеперерабатывающих предприятий, а также для проектных и научно-исследовательских организаций весьма важной информацией является детальная характеристика состава исходного нефтяного сырья. Чем более полная информация имеется о качестве сырья, тем более качественно будет построен процесс моделирования процессов переработки. Современные методы анализа сырья позволяют получить базовые данные для построения моделей новых технологических процессов, а также производить планирование производства в программе PIMS (Process Industry Modeling System – система моделирования перерабатывающей промышленности) [1].

Прогнозирование качественных характеристик потоков нефтепродуктов и конечной продукции на установках выполняется с учетом корреляционной зависимости между составом нефтяного сырья, физико-химическими характеристиками полуфабрикатов, эксплуатационными характеристиками технологических установок, что играет важную роль при разработке новой конкурентоспособной продукции [2, 3].

Основным источником сырья для ООО «Афипский НПЗ» служит смесь Западно-Сибирской нефти. На территории Западной Си-

бири добывается 70% от всей российской нефти. Тракт нефтепровода проходит через ряд городов и поселков от Нижнего Новгорода до Ангарска. Нефти из Западно-Сибирского месторождения могут поступать на НПЗ, находящиеся и на водных путях, а также в морской терминал города Туапсе. Новые нефтеперерабатывающие заводы в районах добычи нефти уже не строят. Они сооружаются на существующих трассах нефтепроводов. Западно-Сибирская нефть добывается из разных месторождений и в разных пластах: Восточно-Сургутская, Мало-Балыкская, Приобская, Покачевская, Варьганская, Губкинская, Уренгойская, Ен-Яхинская, Русская, Новопортовская, Бованенковская, Харампурская, Кальчинская, Ханты-Мансийская, Нефть экспортная URALS [4], поэтому ее качество может различаться в зависимости от места добычи.

В последнее время наблюдается ухудшение качества нефти, подаваемой на переработку. Увеличение содержания серы и сероводорода широко освещено в различных публикациях. Следует также обратить внимание на повышение доли парафина в Западно-Сибирской нефти, который, в свою очередь, приводит к снижению общего выхода легких фракций, так как снижается плотность нефти и вязкость [5].



**Рис. 1.** Химический состав нефти Западной Сибири

Основной сорт нефти URALS, поступающий на Юг России, представлен на рисунке 1 [4].

Состав нефти меняется при транспортировке, и задача изучения состава нефти стоит остро. Для изучения состава нефти на первое место выходят методы хроматографического анализа, а также сложные аппараты для автоматической разгонки нефти. Большую работу в данном направлении проводят ВНИИ НП и Средневожский НИИ НП, который также разрабатывает новые методики для более качественного и углубленного изучения нефти [6].

Ниже приводится краткий перечень современных приборов для определения фракционного состава нефтяного сырья.

Производством В/R Instrument США представлен прибор, на котором возможно выполнение анализа по методам ASTM D2892–18 и ASTM D5236 – это автоматическая установка для атмосферно-вакуумной дистилляции сырой нефти и остаточных нефтепродуктов, которая приведена на рисунке 2. [7]

Во Франции фирма ISL-by-PAC разработала автоматический поточный анализатор фракционного состава нефтепродуктов MicroDist™ (рисунок 3), предназначенный для выполнения анализов по методам



**Рис. 3.** Аппарат MicroDist

ASTM D7345, ASTM D86, IP 123, ISO 3405, ГОСТ 2177, ГОСТ Р ЕН ИСО 3405 [7].

В Нидерландах выполнение анализов по методам ASTM D3710, ASTM D7096, ASTM D2887, ASTM D5442, ASTM D7213, ASTM D7398, ASTM D6352, ASTM D7169, ASTM D7500, EN 15199-3, EN 15199-1, EN 15199-2, IP 406, IP 480, IP 507, IP 545, ISO 3924 производителем ANALYTICAL CONTROLS-by-PAC разработан современный аппарат AC SimDis, представленный на рисунке 4 [7]. На нем можно выполнять одновременное определение фракционного состава по углеводородным веществам, по азотистым и сернистым соединениям в нефти и нефтепродуктах.

Все указанные аппараты современные,



**Рис. 2.** Аппарат Automaxx

позволяют выполнить автоматически все испытания, интегрируются с программным обеспечением и выдают результаты в различных удобных вариантах для обработки данных. Основным недостатком можно выделить, что все они иностранного производства, комплектующие зависят от курса валют и весьма дорогие в плане обслуживания.

В России производители предлагают современные аппараты для определения фракционного состава при атмосферном давлении, немного уступающие по техническим возможностям, на основе АРН-2, такие вариации как АРН-ЛАБ-11, АРН-ЛАБ-03, Линтел АРНС-21, АФС-02 [8, 9] (рисунок 5, 6).

Однако при грантовой поддержке Фонда Сколково исследования осуществляются новым производителем лабораторного оборудования и техники – компанией TECHNO. Разработанный автоматический анализатор для определения фракционного состава DIST-A1 снабжен всеми необходимыми современными функциями, большим дисплеем с выводом схемы и параметров процесса дистилляции во время испытания [10]. По функциональным характеристикам прибор не уступает зарубежным аналогам, обладает широким спектром методов: ASTM D86, ISO 3405, E123, DIN51751, ГОСТ Р 53707, ГОСТ 2177, ГОСТ Р ЕН ИСО 3405, IP195, ГОСТ ISO 3405. В 2021 году прибор прошел сертификацию соответствия СЕ, сертификат выдается с учетом результатов испытаний в сертификационных органах Евросоюза и лабораториях.

Большинство аппаратов для определения фракционного состава имеют достаточно большую массу и габаритные площади, длительная продолжительность выполнения испытаний делает данные приборы слишком сложными для оперативного управления процессами в условиях действующих заводов, так одним из примеров можно привести прибор PETRODIST® 200 СС, представленный на рисунке 7 [11]. Полностью автоматическая система фракционирования высококипящих компонентов неф-

ти, управляемая процессором, в соответствии с ASTM D-5236, далее система продолжает дистилляцию с остатком по методу ASTM D-2892. Аппарат управляется компьютером и предназначен для полностью автоматической работы для фракционирования сырой

нефти. Скорость кипения регулируется в соответствии с заранее выбираемой скоростью дистилляции. Автоматическая система обеспечивает процесс создания и поддержания вакуума в соответствии с правилами ASTM, который запускается при достижении предварительно выбираемой температуры колбы (например, при достижении 300°C). Параметры для процесса автоматического уменьшения вакуума рассчитываются и автоматически настраиваются системой в соответствии с фактическими параметрами процесса. При работе аппарата



Рис. 4. Аппарат AC SimDis



Рис. 5. Аппарат APH-2



Рис. 6. Аппарат APH-LAB-11



Рис. 7. Аппарат PETRODIST® 200 CC

обеспечивается непрерывный процесс проведения испытания. Прибор оснащен автоматической системой отслеживания объема в режиме реального времени для измерения объема каждой фракции и определения скорости дистилляции, а также автоматического измерения веса. Кривая истинных температур кипения (ИТК) выводится на печать в процентах по весу и объему.

Как видно из рисунка 7, аппарат имеет весьма габаритные размеры, в зависимости от размера колбы варьируется в пределах (2×3,5×0,9) м.

Не все производственные лаборатории и заводы могут позволить себе приобретение достаточно дорогостоящих и габаритных приборов для выполнения производственных задач.

В связи с этим большой интерес вызывают новейшие направления по математическому моделированию процессов перегонки и развитию анализаторов минидистилляции.

В свете последних событий особое внимание уделяется приборам из таких стран, как Белоруссия, которая преуспела в данном направлении. Производимые приборы для выполнения испытаний по минидистилляции намного удобнее в эксплуатации, быстрее в части получения результатов, являются ком-

пактными по размерам. В публикациях Полоцкого государственного университета описано успешное развитие направления по созданию приборов минидистилляции нефтепродуктов для определения различных вариантов их фракционного состава, в том числе для тяжелых, выкипающих при температурах выше 400°C, и методу ИТК [12]. Приборы для определения фракционного состава представляют собой небольшие аппараты массой до 8 кг, продолжительность анализа пробы составляет не более 10 мин.; объем пробы не более 10 мл. Выпускаются приборы по минидистилляции на заводе «Измеритель» в городе Новополоцк. Оснащенность и программное обеспечение приборов постоянно совершенствуются, основой приборов служит компьютерная система, алгоритмы и математические программы для расшифровки фракционной разгонки с учетом температуры и давления. Внешний вид аппарата приведен на рисунке 8 «Аппарат минидистилляции PMD».

Расчетные методы определения фракционного состава легли в основу патента № 227384 «Определение фракционного состава жидких нефтепродуктов, выкипающих до 400°C, с нахождением молекулярного веса фракций посредством экспресс-перегонки и устройство для этого определения» [13], в котором описаны математические формулы для эмпирического определения характеристик кривой ИТК. Патент был зарегистрирован в 2003 году при соавторстве российских и белорусских ученых. В следующем патенте № 2273845 «Определение фракционного состава жидких нефтепродуктов, выкипающих до 400°C, с нахождением

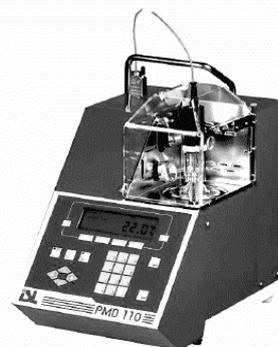


Рис. 8. Аппарат минидистилляции PMD

молекулярного веса фракций посредством экспресс-перегонки и устройство для этого определения» уделено внимание повышению эффективности и воспроизводимости измерений, полученных при определении фракционного состава в традиционной перегонной колбе, окруженной изоляционным защитным чехлом [14]. При выполнении испытаний проводятся измерения температуры с помощью термопары и изменения плотности нефтепродукта тензодатчиком. Все данные поступают на компьютер и обрабатываются специальными алгоритмами. Предлагаемые Полоцким государственным университетом методы определения фракционного состава имеют существенные преимущества: время проведения перегонки сокращается в 5-10 раз, сходимость и воспроизводимость результатов увеличиваются, что немаловажно – аппаратное оформление более простое и надежное в эксплуатации, а габариты и вес приборов намного меньше.

Для проведения автоматизированного процесса фракционной разгонки по методам ГОСТ 2177, ISO3405 в Белоруссии был разработан прибор «АФСА», оснащенный микропроцессорным управлением, датчиками замеров температуры и уровнем меры жидкости. Прибор был зарегистрирован в Государственном реестре Беларуси [15]. Программное обеспечение имеет широкий спектр технических возможностей, таких как проведение дистилляции с определением температур начала и конца кипения, определения скорости дистилляции, замерами паров с корректирующими показателями на атмосферное давление. Аппарат позволяет выводить графики и таблицы с измеренными показателями, изменять программу разгонки, выполнять расчёт цетанового индекса, проводить расчеты процента выкипания пробы, потерь и объемов отгона узких фракций, калибровку датчиков.

Более усовершенствованной версией является прибор «АФСА-С» – автоматический прибор для выполнения испытаний по методам ГОСТ 2177-99, ГОСТ Р 57036-2016, EN ISO 3405:2019. В дополнение к предыдущей версии аппарат дополнен автоматической системой пожаротушения с оптическим детектором, отключением питания и подачей инертного

газа в случае воспламенения или пожара [16]. Установлен цветной дисплей, отображающий процесс дистилляции, параметры разгонки, ошибки прибора. Встроенное программное обеспечение сохраняет данные по результатам испытаний на внутренней памяти с возможностью выгрузки на ПК, а также интеграцией с системой ЛИМС [17].

В России приборы данного модельного ряда положительно зарекомендовали себя в государственных учреждениях. В 2008 году прибор «АФСА-2» был приобретен ОАО «Уралоргсинтез» взамен АРНС-ЛАБ, а уже в 2009 году прибор был рекомендован для исследовательских целей в лабораториях. Подчеркнуто обеспечение прибора программным модулем с наличием программ разгонок на базовые нефтепродукты, легко адаптируемого к испытуемым в лаборатории нефтепродуктам. Отмечено дополнительное преимущество программного обеспечения наличием на сайте производителя обновленных версий ПО.

В 2015 году с прибором АФСА-2 работал ФБУ «Тульский ЦСМ», по результатам эксплуатации в нефтехимической лаборатории испытательного центра прибор рекомендован для использования в лабораториях по контролю качества нефтепродуктов предприятий Российской Федерации. ФГУ «Иркутский ЦСМ» в 2019 году оставил отзыв, отметил простоту и надежность прибора «АФСА», который показал высокую прецизионность полученных результатов.

Что касается аналогов китайского производства, то предлагается на рынке небольшой ассортимент, один из приборов, такой как аппарат SYP2001-V фирмы Shanghai SHENKAI Petroleum Equipment Co., Ltd. [17]. Диапазон температуры дистилляции в пределах от 0 до 400°C, прибор автоматически проводит фракционирование, на дисплей выводятся в режиме реального времени необходимые параметры и кривая ИТК. Ручные аппараты, внешне напоминающие АРН-2, модели SYP2001-III и SYP2001-VI уже сняты с производства. Полуавтоматические аппараты для определения фракционного состава нефтепродуктов представлены в двух вариациях: модель SYP2001-VIB с холодильной установкой, модель SYP2001-V

со встроенной холодильной установкой. Приборы достаточно простые в плане аппаратного оформления и выполнения испытаний. На жидкокристаллическом сенсорном дисплее выводятся температуры охлаждающей бани, а также температуры камер приемных цилиндров и время проведения испытания. Управление нагревом колб выполняется вручную при помощи регулятора напряжения, по термометру лаборантом ведется визуальный контроль температуры.

В последних публикациях [21] китайскими учеными было подтверждено, что существенную роль при моделировании новых процессов гидрокрекинга имеет качественное и глубокое исследование состава и свойств сырья, а также определение массового выхода продуктов, в частности вакуумного газойля. Из примерно 50 параметров для калибровки модели в программном обеспечении наиболее чувствительным является выход продуктов, особенно для калибровки модели установки для корреляции данных между прогнозным расчетным выходом продуктов и действительным, получаемым на реальных установках. Для более глубокой оценки модели используются и вспомогательные характеристики сы-



Рис. 9. Аппарат MINIDIST PLUS

рья, такие как плотность и содержание серы во фракции газойля.

Одним из технически сложных аппаратов для атмосферной и вакуумной разгонки сырой нефти и тяжелых нефтяных остатков является автоматический аппарат MINIDIST PLUS [18], на котором проведена разгонка пробы Западно-Сибирской нефти для ООО «Афипский НПЗ» (рисунок 9). Производителем является французская фирма «Gecil Process S.A.». Га-

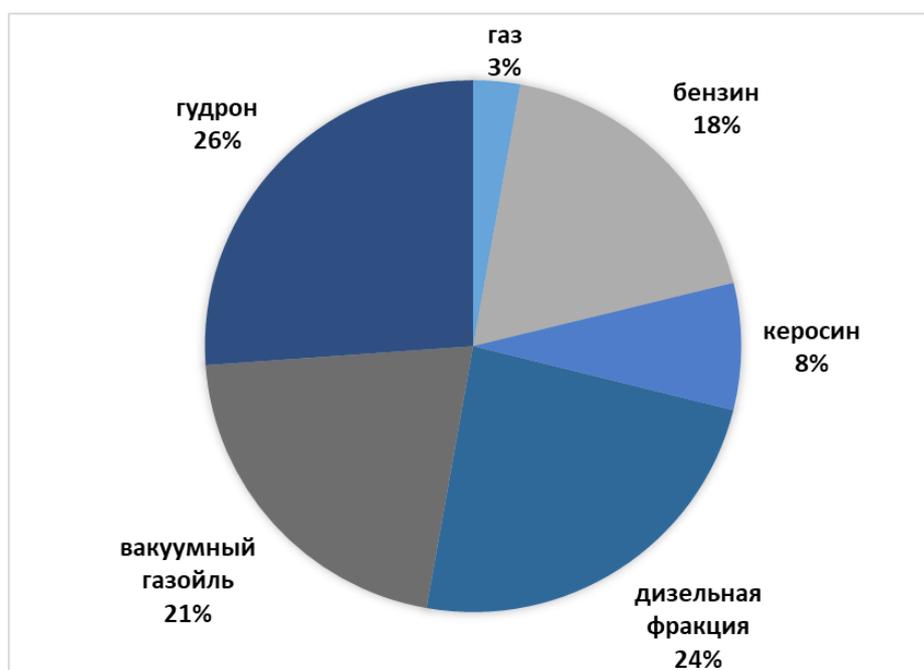


Рис. 10. Результаты определения фракционного состава смеси Западно-Сибирской нефти по методу ASTM D 2892/5236

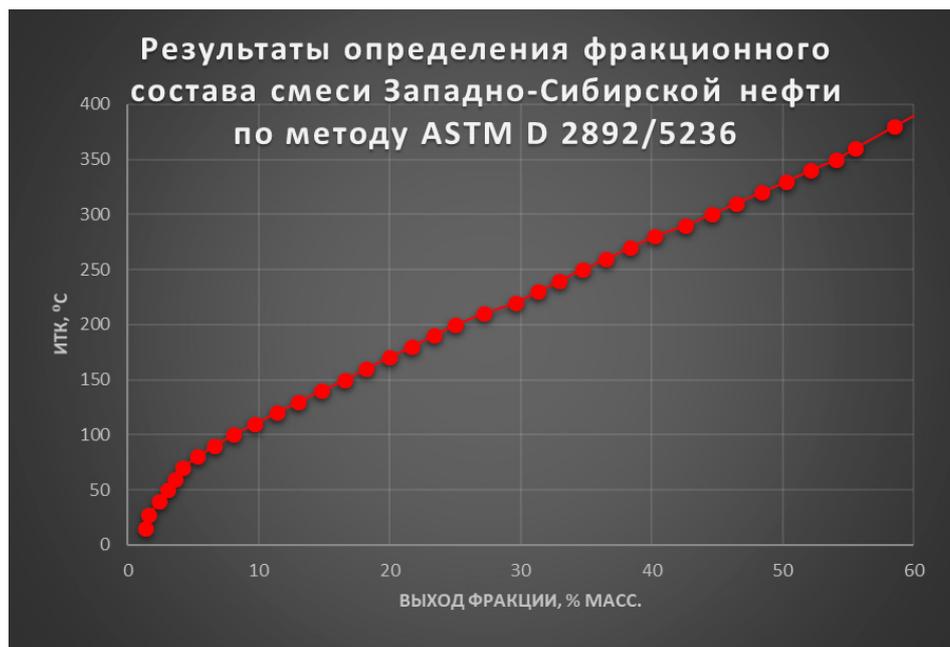


Рис. 11. Кривая ИТК Западно-Сибирской нефти

баритные размеры аппарата: ширина 650 мм x глубина 500 мм x высота 850 мм, вес примерно 110 кг. Современный Minidist Plus оснащен персональным компьютером Pentium с возможностью управления всеми параметрами разгонки в локальном режиме. Лаборант может контролировать аппарат и при необходимости менять режим проведения испытания. Данные в режиме реального времени записываются на компьютер, также существует возможность интеграции с системой LIMS. Для печати выводятся необходимые результаты: графики, таблицы, кривая скорости разгонки, ИТК, масса полученных узких фракций.

Метод проведения испытаний ASTM D 2892-18 «Стандартный метод перегонки сырой нефти (ректификационная колонна с 15 теоретическими тарелками)», ASTM D 5236. Стандартный метод испытания дистилляции тяжелых углеводородных смесей (метод вакуумной дистилляции в перегонном кубе) [19, 20].

На первом этапе испытания была проведена дебутанизация нефти, далее выполнялась перегонка при атмосферном давлении, коэффициент орошения 5:1 для рабочих давлений от 5 до 2 мм рт. ст. Фиксацию температуры при проведении испытаний проводили для всех фракций через каждые 10 градусов. Выход по-

лученных дистиллятов рассчитывали по массе всех фракций, включая газ и остаток в колбе, расчет проводился по объему всех фракций и остатку при 15°C по массе и плотности. Атмосферную перегонку проводили до начала крекинга, после чего понижали давление до 2 мм рт. ст. и продолжили работу под вакуумом. Вакуумная система аппарата позволяет автоматически понижать давление, отбирать масляные тяжелые фракции. При температуре 550°C перегонку прекратили. Прибор позволяет по истечении процесса проведения испытания выполнить автоматическую промывку системы перед выполнением следующего анализа.

Результаты испытаний по целевым фракциям представлены на рисунке 10.

Из полученных данных по результатам разгонки и построенной кривой ИТК, представленной на рисунке 11, определено, что потенциальное содержание светлых фракций составляет 54,1%.

Как видно из рисунка 10, вакуумного газойля в сырье порядка 21%, после модернизации он послужит сырьем для установки гидрокрекинга, по потенциальному содержанию в нефти будет рассчитана загрузка установки по сырью и получен расчетный материальный

баланс с выходом экологичного топлива класса Евро-5. Гудрон в количестве 26% послужит сырьем установки замедленного коксования или установки деасфальтизации для получения товарного продукта.

Результаты полученной разгонки сырьевой смеси ООО «Афипский НПЗ» будут использованы в качестве исходных данных в программном обеспечении PIMS для проведения экономического расчета и выполнения материально-го баланса при полной модернизации завода.

На основании вышеизложенного следует отметить широкий ассортимент лабораторного оборудования на мировом рынке, к выбору которого при проведении исследований состава нефтяного сырья необходимо отнестись с от-

ветственностью, так как полученные результаты напрямую оказывают влияние на дальнейшую работу. Полученные данные по результатам исследований положены в основу компьютерного моделирования производственных установок. Расчетные математические модели современных технологических объектов глубокой переработки нефти позволят определить технологические параметры для увеличения глубины переработки до 99%. Для дальнейшей калибровки и наладки модели технологической цепочки предприятия необходимо будет обновлять сведения по исследованию и углублению данных по качеству нефтяного сырья с целью получения более адекватных результатов расчета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Занозин И. Ю., Занозина И. И. Хроматография в аналитическом сопровождении нефтепереработки // Метрология и стандартизация. 2021. № 2. С. 32-42.
2. Алаторцев Е. И. Методология определения эксплуатационных и физико-химических свойств топлив на основе хроматографической информации / С. А. Леонтьева, Е. В. Подлеснова, М. К. Цыганова // Мир нефтепродуктов // Вестник нефтяных компаний. 2019. № 6. С. 37-42.
3. Черепица С. В. Методика газохроматографического анализа автомобильных бензинов / С. М. Бычков, С. В. Гациха, А. Н. Коваленко, А. Л. Мазаник, Д. Е. Кузменков, Я. Л. Лучина, Н. Н. Гремяко // ХТТМ. 2001. № 4. С. 44-48.
4. Развитие системы транспорта нефти на северо-западе России в 2001-2007 годах: трубопроводный и морской транспорт /2022/ Экобыттех. Электронный ресурс <https://ecobeltex.ru/problemu/kachestvo-nefti-zapadno-sibirskoj-neftyanoj-bazy.html>
5. Кузнецова В. М., Петров Д. И. Изменение качества нефти в зависимости от содержания парафинов, смол и асфальтенов // Молодой учёный. № 4 (138). Январь 2017.
6. Занозина И. И. Система независимого углубленного исследования нефтесырья: проблемы, решения, опыт / В. А. Тыщенко, М. В. Бабинцева, И. В. Спиридонова, Н. Ю. Гарина, А. Ю. Еlicheva, И. Ю. Занозин, Т. Н. Шабалина // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2018. № 6. С. 16-20.
7. Электронный ресурс <https://www.neolabllc.ru>
8. Электронный ресурс <https://www.neft-standart.ru>
9. Электронный ресурс <https://labteh.com>
10. Электронный ресурс <http://www.techno-lab.su/instruments/dist-a1/>
11. Буклет PETRODIST ® Crude oil distillation systems according to ASTM – standards for fractionation and boiling analysis, Version 14/ december 2013. С. 20-23.
12. Абаев Г. Н. Математическое описание фракционной разгонки нефтепродуктов и современные методы её определения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В // Промышленность. Прикладные науки. Химическая технология. 2013. № 3. С. 145-149.
13. Абаев Г. Н., Шумилин Ю. В. Определение фракционного состава жидких нефтепродуктов, выкипающих до 400°C, с нахождением молекулярного веса фракций посредством экспресс-перегонки и устройство для этого определения: пат. Рос. Федерации 227384.
14. Определение фракционного состава жидких нефтепродуктов, выкипающих до 400°C, с

- нахождением молекулярного веса фракций посредством экспресс-перегонки и устройством для этого определения: пат. 2273845 / Г.Н. Абаев [и др.]; заявл. в 2003 г.
15. Электронный ресурс [https://novohim.com/product\\_info.php?products\\_id=1043](https://novohim.com/product_info.php?products_id=1043)
  16. Электронный ресурс <https://bmclab.su/catalog/neftehimicheskoe-oborudovanie/analizator-afsa.html#>
  17. Электронный ресурс <https://b<sup>2</sup>b-postavki.ru/predstavitel/shanghai-shenkai-petroleum-equipment-co-ltd.html?ysclid=I30bb9sbo4>
  18. Электронный ресурс <https://www.avrora-test.ru/detail/?ID=522>
  19. ASTM D 2892-18 «Стандартный метод перегонки сырой нефти (ректификационная колонна с 15 теоретическими тарелками)».
  20. ASTM D 5236. Стандартный метод испытания дистилляции тяжелых углеводородных смесей (метод вакуумной дистилляции в перегонном кубе).
  21. *Chen Fan, Jian Long*. Моделирование влияния свойств сырья на распределение продуктов промышленного производства // НЕФТЕХИМИЯ. Том 60. №2. 2020. С. 192-198.

## INVESTIGATION OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF OIL RAW MATERIALS OF AFIPSKY REFINERY LLC ON THE APPARATUS OF COMPLETE OIL DISTRIBUTION

© A. V. Sidorov, Yu. P. Yasyan  
*KSTU, University, Krasnodar, Russia*

In this paper, an analysis of the oil feedstock of Afipsky Oil Refinery LLC is carried out, modern methods of oil research are briefly considered. The results of qualitative determination of narrow distillate fractions are presented. Calculation mathematical models of modern technological facilities for deep oil refining will allow determining technological parameters to increase the depth of processing results

**Keywords:** research, oil, fractional composition, modeling system, chemical composition

### REFERENCES

1. Zanozin I.Yu., Zanozina I.I. (2021) 'Khromatografiya v analiticheskom soprovozhdenii neftepererabotki. Metrologiya i standartizatsiya Chromatography in the analytical support of oil refining'. *Metrology and standardization*. №2. Pp. 32-42.
2. Alatorsev, E. I., Leont'eva, S. A., Podlesnova, E. V. and Tsyganova, M. K. (2019) 'Izmenenie kachestva nefti v zavisimosti ot sodержaniya parafinov, smol i asfal'tenov'. *Molodoi uchenyi*. [Methodology for determining the operational and physico-chemical properties of fuels based on chromatographic information. World of Oil Products. Bulletin of oil companies]. №6. P. 37-42.
3. Cherepita, S. V., Bychkov, S. M., Gatsikha, S. V., Kovalenko, A. N., Mazanik, A. L., Kuzmenkov, D. E., Luchina, Ya. L. and Gremyako, N. N. (2001) Metodika gazokhromatograficheskogo analiza avtomobil'nykh benzinov. KhTTM. [Technique of gas chromatographic analysis of automobile gasolines. KhTTM]. №4. P. 44.48.

4. 2022. Razvitie sistemy transporta nefiti na severo-zapade Rossii v 2001-2007 godakh: truboprovodnyi i morskoi transport. Ekobyttekh. [Development of the oil transportation system in the north-west of Russia in 2001-2007: pipeline and sea transport. Ecobyttech]. Available at: <https://ecobeltex.ru/problemy/kachestvo-nefti-zapadno-sibirskoj-neftyanoj-bazy.html>
5. Kuznetsova, V. M. and Petrov, D. I. (2017) 'Sistema nezavisimogo uglublennogo issledovaniya neftesyr'ya: problemy, resheniya, opyt. Mir nefteproduktov'. *Vestnik neftyanykh kompanii*. [Change in oil quality depending on the content of paraffins, resins and asphaltenes. Young scientist]. №4 (138). January 2017.
6. Zanozina, I. I., Tyshchenko, V. A., Babintseva, M. V., Spiridonova, I. V., Garina, N. Yu., Elicheva, A. Yu., Zanozin, I. Yu. and Shabalina, T. N. (2018) 'Sistema nezavisimogo uglublennogo issledovaniya neftesyr'ya: problemy, resheniya, opyt'. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii*. [System of an independent in-depth study of oil raw materials: problems, solutions, experience. World of Oil Products. Bulletin of oil companies]. №6. P. 16-20.
7. Available at: <https://www.neolabllc.ru>
8. Available at: <https://www.neft-standart.ru>.
9. Available at: <https://labteh.com>
10. Available at: <https://labteh.com>
11. Booklet PETRODIST ® Crude oil distillation systems according to ASTM – standards for fractionation and boiling analysis, Version 14/ December 2013, pp. 20-23.
12. Abaev, G. N. (2013) 'Matematicheskoe opisanie fraktsionnoi razgonki nefteproduktov i sovremennyye metody ee opredeleniya'. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki. Khimicheskaya tekhnologiya* [Mathematical description of fractional distillation of petroleum products and modern methods of its determination. Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences. Chemical technology]. №3. Pp. 145-149.
13. Abaev, G. N. and Shumilin, Yu. V. Opredelenie fraktsionnogo sostava zhidkikh nefteproduktov, vykipayushchikh do 400 °S, s nakhozhdeniem molekulyarnogo vesa fraktsii posredstvom ekspress-peregonki i ustroystvo dlya etogo opredeleniya: pat. Ros. Federatsii 227384. [Determination of the fractional composition of liquid petroleum products boiling up to 400° C, with finding the molecular weight of fractions by express distillation and a device for this determination: pat. Ros. Federation 227384].
14. Abaev, G. N. and others (2003) Opredelenie fraktsionnogo sostava zhidkikh nefteproduktov, vykipayushchikh do 400 °S s nakhozhdeniem molekulyarnogo vesa fraktsii posredstvom ekspress-peregonki i ustroystvo dlya etogo opredeleniya: pat. 2273845. [Determination of the fractional composition of liquid petroleum products boiling up to 400° C with finding the molecular weight of fractions by express distillation and a device for this determination: pat. 2273845 / declared in 2003].
15. Available at: [https://novohim.com/product\\_info.php?products\\_id=1043](https://novohim.com/product_info.php?products_id=1043)
16. Available at: <https://bmclab.su/catalog/neftehimicheskoe-oborudovanie/analizator-afsa.html#>
17. Available at: <https://b2b-postavki.ru/predstavitel/shanghai-shenkai-petroleum-equipment-co-ltd.html?ysclid=l30bb9sbo4>
18. Available at: <https://www.avrora-test.ru/detail/?ID=522>
19. ASTM D 2892-18 «Standartnyi metod peregonki syroi nefiti (rektifikatsionnaya kolonna s 15 teoreticheskimi tarelkami)». [ASTM D 2892-18 “Standard method for the distillation of crude oil (distillation column with 15 theoretical plates)”].
20. ASTM D 5236. Standartnyi metod ispytaniya distillyatsii tyazhelykh uglevodorodnykh smesei (metod vakuumnoi distillyatsii v peregonnom kube). [ASTM D 5236. Standard Test Method for Distillation of Heavy Hydrocarbon Mixtures (Vacuum Pot Still Distillation Method)].
21. Chen, Fan and Jian, Long (2020) 'Modelirovanie vliyaniya svoistv syr'ya na raspredelenie produktov promyshlennogo proizvodstva'. *Neftekhimiya*. [Modeling the influence of raw material properties on the distribution of industrial products. Petrochemistry], Volume 60. №2. Pp. 192-198.

**ВЕСТНИК ГГНТУ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**2022. Том XVIII. № 3 (29)**

Редактор – *Таймасханова З.Р.*  
Корректор, дизайн и верстка – *Маслов Е.Н.*  
Технический секретарь – *Алаудинова А.И.*

Выход в свет 24.10.2022  
Формат 60x84/8. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 11,4. Тираж 350 экз. Заказ № 95

Свободная цена

Типография: ИПЦ ИП Цопанова А.Ю.  
362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-79693 от 27 ноября 2020 г.

Журнал основан в 2001 г.