

UDC 666.7  
IRSTI 67.15.33  
RESEARCH ARTICLE

## STUDY OF THE PROPERTIES OF MODIFIED BINDER OBTAINED ON THE BASIS OF BENEFICIATION WASTE OF THE MINING AND PROCESSING PLANT

A.S. Yestemessova<sup>1</sup> , A.M. Zhilkibaeva<sup>1,\*</sup> , L.Y. Matveeva<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>International Educational Corporation, 050028, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 190005, St. Petersburg, Russia

---

**Abstract.** *The introduction of active mineral additives into cement makes it possible to obtain concrete with high physical, mechanical and operational characteristics, namely, they increase the density, water resistance, frost, sulfate, alkali resistance and salt resistance of concretes and mortars, while reducing the consumption of clinker cement. The scale of construction of facilities using cement concrete is growing every year, which raises the question of reducing the consumption of clinker cement, due to the high energy intensity of production using active mineral additives. The use of active mineral additives in the form of waste from enrichment has high economic and environmental significance. The article examines the ways of using waste tailings of polymetallic ore enrichment in cement as a complex modified binder with an active mineral additive. To select the optimal ratio of silica and Balkhash GOK enrichment waste, their pozzolan activity was determined, which is 3.8-4 times higher for silica than for BGOK waste. The pozzolan activity of Balkhash GOK enrichment waste 16 hours after mixing with lime solution is 24 mg/g, and microsilicon is 114 mg/g. The pozzolan activity of a complex mineral additive for cements consisting of 60% of Balkhash GOK enrichment waste and 40% of microsilicon is 48 mg/g. The introduction of 40% silica into the Balkhash GOK enrichment waste increases the pozzolan activity of the complex additive by 2 times. This made it possible to obtain a modified binder using a complex mineral additive of up to 20%.*

**Keywords:** *active additive, modified binder, enrichment waste, pozzolan activity, microsilicon, mineral additive.*

---

**\*Corresponding author**

Aliya Zhilkibaeva, e-mail: [aliya8706@mail.ru](mailto:aliya8706@mail.ru)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-02>

Received 05 February 2024; Revised 27 March 2024; Accepted 15 April 2024

## ТАУ-КЕН БАЙЫТУ КОМБИНАТЫНЫҢ БАЙЫТУ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ АЛЫНҒАН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ТҰТҚЫР ЗАТТЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.С. Естемесова<sup>1</sup> , А.М. Жилкибаева<sup>1,\*</sup> , Л.Ю. Матвеева<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Международная образовательная корпорация, 050028, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, 190005,  
Санкт-Петербург, Ресей

**Аңдатпа.** Цементке белсенді минералды қоспаларды енгізу жоғары физикалық-механикалық және пайдалану сипаттамалары бар бетон алуға мүмкіндік береді, атап айтқанда бетондар мен ерітінділердің тығыздығын, су өткізбейтіндігін, аязға, сульфатқа, сілтіге және тұзға төзімділігін арттырады, сонымен бірге клинкер цементінің шығынын азайтады. Цемент бетонын қолданатын объектілерді салу ауқымы жыл сайын өсіп келеді, нәтижесінде белсенді минералды қоспаларды қолдана отырып, өндірістің үлкен энергия сыйымдылығына байланысты клинкер цементінің шығынын азайту мәселесі туындайды. Байыту өндірістерінің қалдықтары түрінде белсенді минералды қоспаларды пайдалану жоғары экономикалық және экологиялық маңызға ие. Мақалада белсенді минералды қоспамен күрделі модификацияланған тұтқыр ретінде цемент құрамында полиметалл кендерін байыту қалдықтарын қолдану әдістері зерттелген. Микрокремнезем мен Балқаш КБК байыту қалдықтарының оңтайлы арақатынасын таңдау үшін олардың позолан белсенділігі анықталды, ол микрокремнезем үшін БГОК қалдықтарынан 3,8-4 есе жоғары. Әк ерітіндісімен араластырғаннан кейін 16 сағаттан соң Балқаш КБК байыту қалдықтарының позолан белсенділігі 24 мг/г, ал микрокремнезем – 114 мг/г құрайды. Балқаш КБК байыту қалдықтарының 60% - из және микрокремнеземнің 40% - из құрайтын цементтерге арналған кешенді минералды қоспаның позолан белсенділігі 48 мг/г құрайды. Балқаш КБК байыту қалдықтарының құрамына микрокремнеземнің 40% - енгізу кешенді қоспаның позолан белсенділігін 2 есе арттырады. Бұл 20% дейін күрделі минералды қоспаны қолдана отырып модификацияланған тұтқыр зат алуға мүмкіндік берді.

**Түйін сөздер:** белсенді қоспа, модификацияланған тұтқыр, байыту қалдықтары, пуццолан белсенділігі, микрокремнезем, минералды қоспа.

\*Автор-корреспондент

Алия Жилкибаева, e-mail: aliya8706@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-02>

Алынды 05 ақпан 2024; Қайта қаралды 27 наурыз 2024; Қабылданды 15 сәуір 2024.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ГОК

А.С. Естемесова<sup>1</sup> , А.М. Жилкибаева<sup>1,\*</sup> , Л.Ю. Матвеева<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Международная образовательная корпорация, 050028, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный Университет, 190005, Санкт-Петербург, Россия

---

**Аннотация.** Введение активных минеральных добавок в цемент дает возможность получить бетон с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, а именно повышают плотность, водонепроницаемость, морозо-, сульфато-, щелочестойкость и солестойкость бетонов и строительных растворов, уменьшая одновременно расход клинкерного цемента. Масштабы строительства объектов с использованием цементного бетона растут с каждым годом, вследствие чего встает вопрос о сокращении расхода клинкерного цемента, в связи с большой энергоемкостью производства, используя активные минеральные добавки. Использование активных минеральных добавок в виде отходов производств обогащения имеет высокую экономическую и экологическую значимость. В статье исследованы способы применения отходов хвостов обогащения полиметаллических руд в составе цемента, как комплексного модифицированного вяжущего с активной минеральной добавкой. Для подбора оптимального соотношения микрокремнезема и отходов обогащения Балхашского ГОК определена их пуццолановая активность, которая составляет для микрокремнезема в 3,8-4 раза выше, чем у отходов БГОК. Пуццолановая активность отходов обогащения Балхашского ГОК через 16 часов после смешивания с раствором извести составляет 24 мг/г, а микрокремнезема – 114 мг/г. Пуццолановая активность комплексной минеральной добавки для цементов состоящего из 60% отходов обогащения Балхашского ГОК и 40% микрокремнезема составляет 48 мг/г. Введение в состав отходов обогащения Балхашского ГОК 40% микрокремнезема повышает пуццолановую активность комплексной добавки в 2 раза. Что позволило получить модифицированное вяжущее с применением комплексной минеральной добавки до 20%.

**Ключевые слова:** активная минеральная добавка, модифицированное вяжущее, отходы обогащения, пуццолановая активность, микрокремнезем.

---

\*Автор-корреспондент

Алия Жилкибаева, e-mail: aliya8706@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-02>

Поступила 05 февраля 2024 г.; Пересмотрено 27 марта 2024 г.; Принято 15 апреля 2024 г.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING**

The study was conducted using private sources of funding.

#### **CONFLICT OF INTEREST**

The authors state that there is no conflict of interest.

---

#### **АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ**

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

#### **МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ**

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

---

#### **БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

#### **КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Использование отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов (ГОК) для создания модифицированных вяжущих материалов представляет собой важное направление в области строительных материалов и экологической инженерии. Модифицированные вяжущие материалы, полученные на основе отходов обогащения, обладают рядом уникальных свойств, которые делают их привлекательными для применения в различных строительных и дорожных конструкциях. К таким свойствам можно отнести повышенную прочность, улучшенную морозостойкость и устойчивость к агрессивным средам. Эти характеристики обеспечиваются за счет оптимального подбора компонентов и условий синтеза, что является предметом текущих научных исследований.

Введение отходов обогащения в состав вяжущих материалов не только способствует их утилизации, но и позволяет создать более устойчивые и экологически безопасные строительные решения. Настоящее исследование направлено на изучение физико-механических свойств модифицированных вяжущих материалов, разработанных на основе отходов ГОК, и оценку их потенциала для широкого практического применения.

Для решения проблем, связанных с экономией невозпроизводимых природных ресурсов, необходимо переходить на современные методы получения бетонов нового поколения, а именно на производство модифицированных бетонов с применением модифицированных вяжущих. Основой такого подхода является частичное замещение клинкера, самого дорогого цементной составляющей, тонкодисперсными активными минеральными компонентами природного либо техногенного происхождения, обладающими значительной внутренней энергией и химической активностью. Для получения высококачественных модифицированных вяжущих необходимо целенаправленно управлять технологией производства на основе применения активных минеральных компонентов, использования химических модификаторов и эффективных технологических приемов для активации их свойств. Таким образом, разработка эффективных составов модифицированных вяжущих с применением тонкодисперсных активных минеральных добавок для производства модифицированного бетона, актуальна для современного строительного материаловедения.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ развития цементной промышленности, позволяет сделать вывод, что в технологию производства портландцементного клинкера активно вводятся активные минеральные добавки, которые далее применяются для производства высокопрочных бетонов. В странах Западной Европы выпускают клинкерные вяжущие, которые содержат до 35 % активных минеральных добавок, до 20 % известняка и до 80 % комплексных добавок, включающих доменный шлак, каменноугольную золу-унос и др., что связано с необходимостью энергосбережения при производстве портландцемента. Известно, что на 1 тонну портландцементного клинкера расходуется до 230 кг условного топлива, а на сушку минеральных добавок до 20 кг/т (Nalimov & Mulchenko, 1969, Singh et al., 2017; Guvalov et al., 2017; Berdov et al., 2014; Zhakipbekov & Shaltabayeva, 2009; Pshenichnyi, 2019). Увеличение содержания минеральных добавок дает возможность для более полной реализации использования их гидравлической реакционной активности, и наблюдается положительное влияние их на формирование структуры цементного камня и бетонов.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения модифицированного вяжущего были использованы следующие материалы: сульфатостойкий портландцемент ТОО «Каспий Цемент» ЦЕМ I 42,5 СС, отходы хвостов обогащения Балхашского горно-обогатительного комбината (ГОК) и микрокремнезем ТОО «General Service», (Караганда).

Характеристики сульфатостойкого цемента приведены в [Таблице 1](#).

Таблица 1

Характеристика сульфатостойкого портландцемента ТОО «Каспий Цемент» ЦЕМ I 42,5 СС, (GOST 22266-2013, 2013)

Наименование показателей, единица измерения	НД на методы испытаний	Нормы по НД	Фактическое значение
Тонкость помола, % (остаток на сите 009 мм)	ГОСТ 30744-2001	Не нормируется	1,3
Удельная поверхность по Блейну, см <sup>2</sup> /г	ГОСТ 30744-2001	Не менее 2500	3500
Нормальная густота цементного теста, %	ГОСТ 30744-2001	Не нормируется	26,2
Равномерность изменения объёма, мм	ГОСТ 30744-2001	Не более 10,0	1,5
Начало схватывания, мин	ГОСТ 30744-2001	Не ранее 60,0	140
Прочность на сжатие в возрасте 2 суток, МПа	ГОСТ 30744-2001	Не менее 10,0	26,5
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	ГОСТ 30744-2001	Не менее 42,5 Не более 62,5	46,9
Потери массы при прокаливании, %	ГОСТ 5382-91	Не более 3,0	2,53
Содержание оксида серы SO <sub>3</sub> , %	ГОСТ 5382-91	Не более 2,7	2,46
Содержание хлорид-иона Cl, %	ГОСТ 5382-91	Не более 0,1	0,01
Содержание нерастворимого остатка, %	ГОСТ 5382-91	Не более 3,0	0,56
Содержание C <sub>3</sub> A, %	ГОСТ 22266-2013	Не более 3,5	2,97
Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	ГОСТ 22266-2013	Не более 5	4,18
Содержание MgO, %	ГОСТ 22266-2013	Не более 5	0,77

Применяемые добавки в зависимости от их влияния на свойства цемента, подразделяют на активные минеральные добавки, наполнители, технологические добавки и добавки, регулирующие основные и специальные свойства цемента.

Активные минеральные добавки при этом должны обладать гидравлическими или пуццолановыми свойствами. Проявление добавками указанных свойств определяют, как по внешним признакам (по концу схватывания, прочности и водостойкости схватившегося теста) или путем прямого измерения их химической активности (Zhil kibayeva, 2021).

Пуццолановую активность комплексной минеральной добавки различного состава определяли по ГОСТ 25094-2015 «Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности» (Zhil kibayeva & Yestemessova, 2020) по показателю поглощения извести из насыщенного раствора (Таблица 2).

Таблица 2

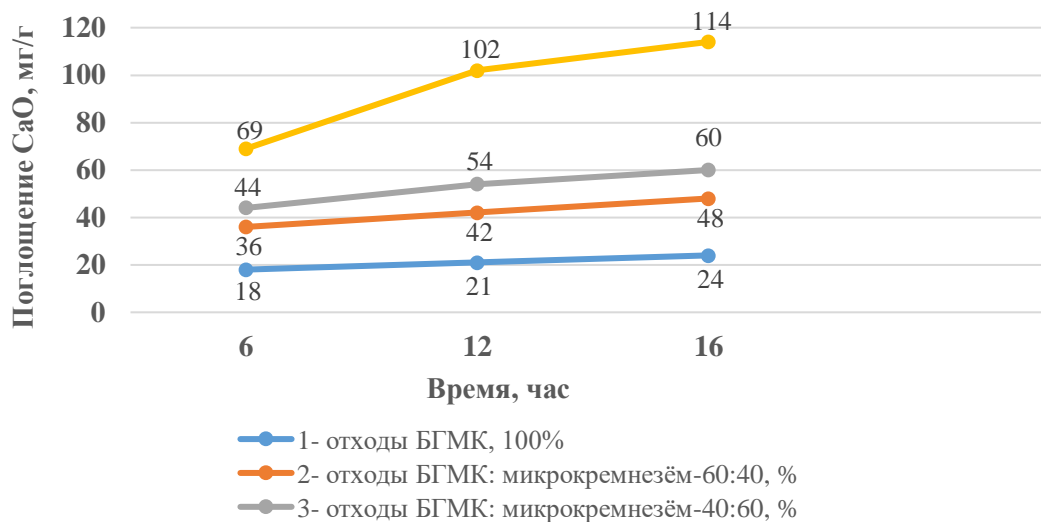
Пуццолановая активность комплексной минеральной добавки различного состава (материалы авторов)

Состав комплексной минеральной добавки, %		Поглощение CaO, мг/г через час		
отходы БГОК	микрокремнезем	6	12	16
100	0	18	21	24
90	10	21	27	31
80	20	26	30	36
70	30	31	36	42
60	40	36	42	48
50	50	41	49	54
40	60	44	54	60
30	70	53	62	69
20	80	64	71	83
10	90	66	89	98
0	100	69	102	114

Для определения количества поглощения CaO минеральными компонентами в предварительно нагретые и термостатированные при температуре 80°C насыщенные растворы извести вводим исследуемые минералы и тщательно перемешиваем. После определенного времени выдерживания раствора, измеряем титрованием концентрацию Ca(OH)<sub>2</sub> (GOST 25094-2015, 2015).

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты исследований показывает, что пуццолановая активность микрокремнезёма в 3,8-4 раза выше, чем у отходов БГМК (**Zhakupbekov et al., 2021**). Пуццолановая активность отходов БГМК через 16 часов после смешивания с раствором извести составляет 24 мг/г, а микрокремнезёма – 114 мг/г (**Рисунок 1**).



**Рисунок 1** – Пуццолановая активность комплексной минеральной добавки

Кинетика поглощения извести отходами БГМК в начальном периоде (в течение 6 часов) равен 3,0 мг/г, микрокремнезёма – 11,5 мг/г. После 6 часов испытаний скорость поглощения извести отходами БГМК и микрокремнезёмом уменьшается и составляет соответственно 0,5 и 5,5 мг/г за час.

Из **Рисунка 1** (кривая красного цвета) видно, что введение в состав отходов обогащения Балхашского ГОК 40% микрокремнезёма повышает пуццолановую активность комплексной минеральной добавки в 2 раза.

Раздельный процесс поглощения извести тонкомолотым кремнезёмом на два периода отмечен в работе (**Shpynova & Chih, 1978**). Первый период соответствует резкому начальному изменению концентрации гидроксида кальция и вызван адсорбцией  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  на частицах  $\text{SiO}_2$ . Второй период характеризуется меньшей скоростью процесса и продолжающимся понижением концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вследствие осаждения из раствора гидросиликата кальция, образующегося в результате химической реакции.

**Таблица 3**

Составы комплексной минеральной добавки, % (материалы авторов)

Состав комплексной минеральной добавки, %		Пуццолановая активность, мг/г	Нормальная густота, %
отходы БГМК	микрокремнезём		
100	-	24,0	27,0
70	30	42,0	27,5
60	40	48,0	28,0
50	50	54,0	29,0

Введение в состав активных минеральных добавок микрокремнезёма увеличивает водопотребность смеси (**Таблица 3**). Поэтому, дальнейшие исследования влияния

комплексной минеральной добавки на свойства модифицированного вяжущего на основе сульфатостойкого цемента и тяжелых бетонов с их применением проводили со следующим составом: 60% отходы обогащения Балхашского ГОК + 40% микрокремнезем.

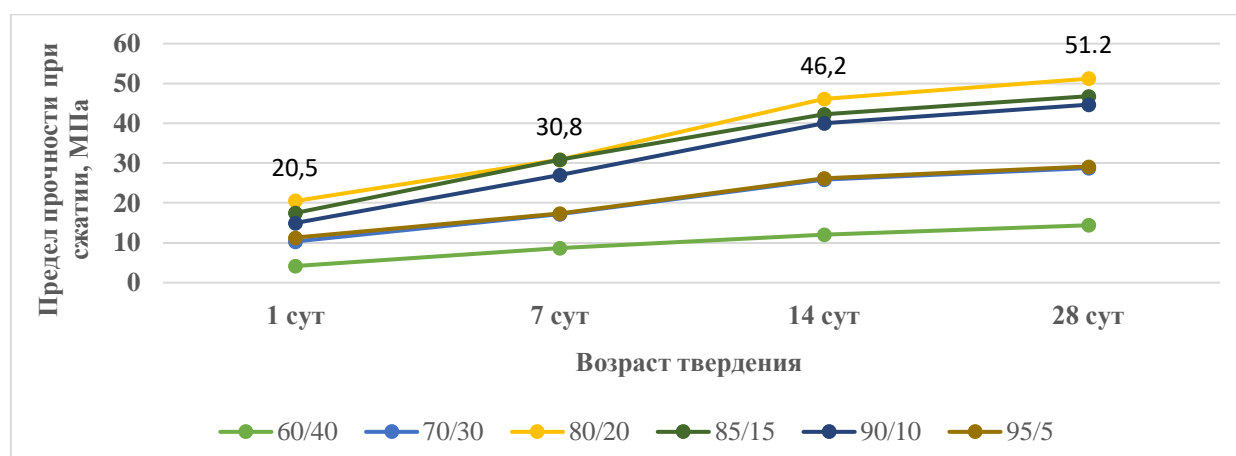
Для получения модифицированного вяжущего с заданными свойствами, экспериментально были проведены лабораторные исследования для определения его физико-механических свойств.

В **Таблице 4** и **Рисунке 2** приведены данные по прочности модифицированных вяжущих в различном соотношении компонентов: сульфатостойкого портландцемента ТОО «Каспий Цемент» ЦЕМ I 42,5 СС и комплексной минеральной добавки.

**Таблица 4**

Прочность модифицированного вяжущего в зависимости от состава комплексной минеральной добавки (материалы авторов)

Составы, % (сульфатостойкий портландцемент ТОО «Каспий Цемент» ЦЕМ I 42,5 СС и комплексная минеральная добавка)	Сроки твердения, сут.			
	1	7	14	28
	Предел прочности при сжатии, МПа			
60/40	4,17	8,64	12,09	14,4
70/30	10,33	17,20	25,8	28,75
80/20	20,49	30,84	46,15	51,2
85/15	17,48	30,84	42,20	46,8
90/10	14,96	27,02	40,03	44,67
95/5	11,31	17,4	26,24	29,16



**Рисунок 2** - Прочность модифицированного вяжущего в зависимости от количества комплексной минеральной добавки

В работе использованы математические методы для построения эмпирических формул, описывающих кривую соотношения 80/20 на графике в соответствии с **Рисунком 2**.

На основе вышеприведенных результатов исследований и согласно планированию исследований по представленным кривым на **Рисунке 2** составили математическую модель. В данном случае математическая модель – однофакторная, так как представлены зависимости набора прочности модифицированного вяжущего от сроков твердения.

Кривые на **Рисунке 2** по Э.М. Менчеру и А.И.Шафету (**Mencher & Shafet, 1971**) подходят под математическую модель, которая описывается уравнением:

$$y = a + bx \quad (1)$$



Далее дифференцируя, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} an + b\sum x = \Sigma y \\ a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \Sigma xy \end{cases} \quad (2)$$

Составим таблицу (**Таблица 5**) исходных данных.

**Таблица 5**

Коэффициенты регрессии (материалы авторов)

n	x	y	x <sup>2</sup>	xy
1	1	20.49	1	20.49
2	7	30.84	49	215.88
3	14	46.15	196	646.1
4	28	51.2	784	1433.6
n=4	$\Sigma 50$	$\Sigma 148,68$	$\Sigma 1030$	$\Sigma 2316,07$

Подставляя получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 4a + 50b = 148,68 \\ 50a + 130b = 2316,07 \end{cases} \quad (3)$$

Длинную систему уравнений решали путем нахождения детерминантов:

$$\Theta = 1620 \quad (4)$$

$$\Theta_a = 37336,9 \quad (5)$$

$$\Theta_b = 1845,28 \quad (6)$$

Таким образом, имеем следующие значения коэффициентов уравнения:

$$a = 23,05 \quad (7)$$

$$b = 1,14 \quad (8)$$

В данном случае для кривой 3, которая соответствует оптимальному количеству содержанию активной минеральной добавки в модифицированном вяжущем (20%) уравнение регрессии примет вид:

$$\hat{y} = 23,05 + 1,14x \quad (9)$$

В связи с исследованием пуццолановой активности модифицированного вяжущего и нормальной густоты, рассмотрим математическую зависимость изменения прочности модифицированного вяжущего от количественного содержания комплексной минеральной добавки.

В данном случае используем математические методы построения эмпирических формул, модель представлена - однофакторная.

По Э.М. Менчуру и А.И. Шафету (**Mencher & Shafet, 1971**) подбираем модель:

$$y = ab^x \quad (10)$$

Тогда, производим преобразования, приводящие данную формулу к линейному типу:

$$\ln y = z; \quad (11)$$

$$\ln a = k_1; \quad (12)$$

$$\ln b = k_2. \quad (13)$$

В этом случае искомое уравнение примет следующий вид:

$$z = k_1 + k_2 \cdot x \quad (14)$$

Дифференцируя получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} k_1 + k_2 \sum x = \sum z \\ k_1 \sum x + k_2 \sum x^2 = \sum x \cdot z \end{cases} \quad (15)$$

Теперь составим **Таблицу 6** исходных данных:

**Таблица 6**

Методика вычисления коэффициентов регрессии (материалы авторов)

x	y	z	x*z	x <sup>2</sup>
5	29.16	1.6	8	25
10	44.67	2.3	23	100
15	46.8	2.7	40.5	225
20	51.2	3.0	60	400
30	28.75	3.4	102	900
40	14.4	3.7	148	1600
$\Sigma 120$	$\Sigma 214.98$	$\Sigma 16.7$	$\Sigma 381.5$	$\Sigma 3250$

Подставим данные таблицы 6 и получим:

$$\begin{cases} k_1 + 120k_2 = 16,7 \\ 120k_1 + 3250k_2 = 381,5 \end{cases} \quad (16)$$

Данную систему уравнений решаем путем нахождения детерминантов:

$$\Theta = 11150$$

(17)

$$\Theta_{k1} = 8495 \quad (18)$$

$$\Theta_{k2} = 1622,5 \quad (19)$$

Тогда получаем значения:

$$K_1 = -0,8 \quad (20)$$

$$K_2 = 0,15 \quad (21)$$

Определяем коэффициенты искомого уравнения:

$$a^{e^{k_1}} = e^{-0,8} = 0,45 \quad (22)$$

$$b^{e^{k_2}} = e^{0,15} = 1,16 \quad (23)$$

Таким образом, наше уравнение регрессии примет следующий вид:

$$y = 0,45 * 1,16^x \quad (24)$$

Выведенные нами математические формулы путем использования однофакторной модели, позволяют в дальнейшем прогнозировать основные показатели исследуемого нами материала, модифицированного вяжущего на основе отходов ГОК и микрокремнезема, не проводя дальнейшие экспериментальные исследования.

В **Таблице 7** приведены данные о влиянии добавляемой комплексной минеральной добавки на сроки схватывания цементного теста.

**Таблица 7**

Влияние комплексной минеральной добавки на сроки схватывания (материалы авторов)

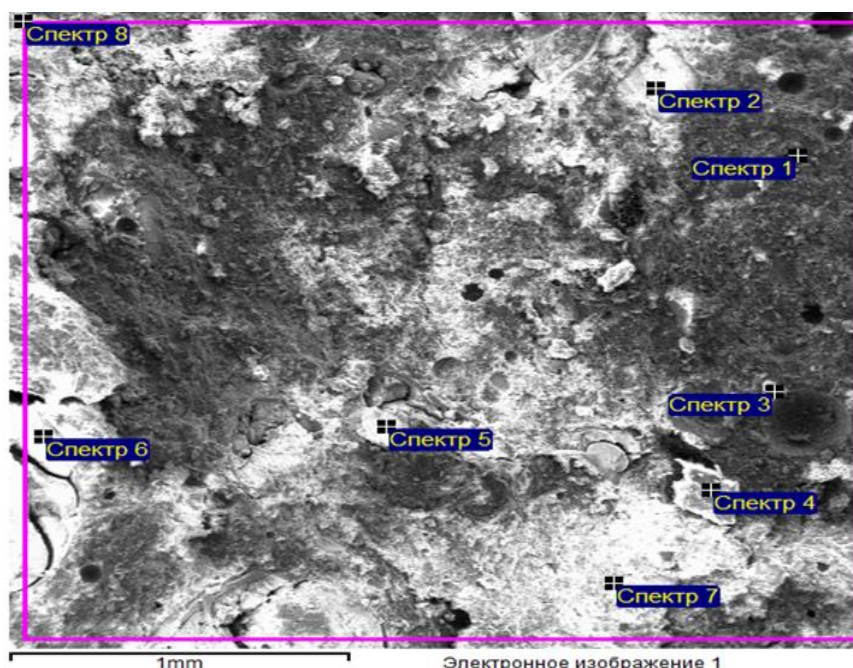
Вид вяжущего вещества	Нормальная плотность, %	Сроки схватывания, ч - мин	
		начало	конец
ЦЕМ I 42,5 СС	26,2	2-20	4-10
МВ-Д20	26,5	2-40	4-30

Конец схватывания теста модифицированного вяжущего МВ-Д20 наступает через 160 мин, что на 20 мин позже по сравнению с цементным тестом без добавки. В конце периода повышает скорость структурообразования и сокращает период от начала до конца схватывания. Период схватывания при этом равняется с периодом цементного теста без добавки.

Однако, по мнению автора ([Slavcheva et al. 2020](#)), традиционные «сроки схватывания» полностью не отражают кинетики структурообразующих процессов цементных систем.

Введение в состав цемента комплексной добавки незначительно увеличивает водопотребность смеси. Это обуславливается не только отведением воды на смачивание добавок, но и тем, что они вследствие действия поверхностных сил изменяют свойства прилегающих к нему слоев цементного теста. Изменяя нормальную плотность цементного теста, комплексная добавка оказывает заметное воздействие и на сроки схватывания.

Спектральный анализ модифицированного вяжущего с 20% комплексной минеральной добавкой (МВ-Д20) приведен на [Рисунке 3](#) и [Таблице 8](#). Результаты анализа показывают, что химический и минералогический составы модифицированного вяжущего соответствуют требованиям ГОСТ 22266-2013 «Цементы сульфатостойкие. Технические требования» ([GOST 22266-2013](#)).



**Рисунок 3** – Спектры рентгеновской флуоресценции и модифицированного вяжущего МВ-Д20 (материалы авторов)

Таблица 8

Элементный состав модифицированного вяжущего МВ-Д20 (материалы авторов)

Спектр	Концентрация обнаруженных элементов, % по массе										Итого
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	
C1	1,44	48,29	-	-	1,23	8,09	1,19	-	35,42	1,6	100,0
C2	5,84	49,40	1,08	0,68	-	33,15	-	1,84	8,70	-	100,0
C3	6,80	51,47	-	0,55	3,72	13,56	1,01	1,51	21,20	-	100,0
C4	6,25	56,45	-	0,48	1,40	8,87	1,51	-	24,21	0,90	100,0
C5	-	31,31	0,87	-	-	51,05	-	5,73	11,05	-	100,0
C6	3,90	60,27	1,31	-	-	29,38	-	2,72	2,43	-	100,0
C7	-	21,25	-	-	0,86	6,12	2,14	-	67,28	2,4	100,0
C8	9,49	51,70	-	0,36	0,94	10,43	0,86	0,40	24,76	1,1	100,0
Макс.	9,49	60,27	1,31	0,68	3,72	51,05	2,14	5,73	67,28	2,4	
Мин.	3,44	21,25	0,87	0,36	0,86	6,12	0,86	0,40	2,43	0,9	

Таким образом, активация отходов обогащения Балхашского ГОК микрокремнезёмом, увеличивая химический потенциал микрочастиц, существенно повышает химическую активность комплексной добавки (Zhilikbayeva et al., 2022). Проведенные исследования показали, что введение в состав отходов обогащения Балхашского ГОК 40% микрокремнезёма повышает пуццолановую активность комплексной добавки в 2 раза. Модифицированное вяжущее полученное на основе комплексной минеральной добавки сокращает водопотребность цементного теста на 18%, и увеличивает при сжатии на 9%.

Определены признаки пригодности техногенного сырья ГОКов для получения КСМ различного назначения и прогноза их основных свойств: повышение плотности, прочности и повышение агрессивной стойкости. Эти признаки основаны на химико-минералогическом составе и на содержании в техногенном сырье тонкодисперсных и наночастиц влияющих на их межфазные контакты.

Имеются данные, что тонкодисперсный кремнезем ускоряет твердение смеси за счет увеличения границы раздела фаз внедренными наночастицами, что сопровождается дополнительным уплотнением и увеличением концентрации той части твердой фазы, которая является основным носителем эффекта упрочнения. Эффект активирования твердения композиционной смеси сопровождается ростом тепловыделения, который могут усиливать тонкодисперсные частицы и наночастицы содержащиеся в техногенном сырье

Известно (Singh et al., 2017; Guvalov et al., 2017; Berdov et al., 2014; Zhakipbekov & Shaltabayeva, 2009; Pshenichnyi, 2019), что применение модифицированного вяжущего в технологии бетона по сравнению с обычным цементом позволяет значительно снизить водопотребность бетонных смесей и интенсифицировать твердение бетона, увеличить его прочностные свойства.

## 5 ВЫВОДЫ

1. Для выбора оптимального соотношения микрокремнезема и отходов обогащения Балхашского ГОК в составе комплексной добавки определены их пуццолановая активность. Пуццолановая активность микрокремнезёма в 3,8-4 раза выше, чем у отходов БГОК. Пуццолановая активность отходов обогащения Балхашского ГОК через 16 часов после смешивания с раствором извести составляет 24 мг/г, а микрокремнезёма – 114 мг/г.

Кинетика поглощения извести отходами обогащения Балхашского ГОК в начальном периоде (в течение 6 часов) равен 3,0 мг/г, микрокремнезёма – 11,5 мг/г. После 6 часов испытаний скорость поглощения извести отходами БГОК и микрокремнезёмом уменьшается и составляет соответственно 0,5 мг/г и 5,5 мг/г за час.

2. Пуццолановая активность комплексной минеральной добавки состоящего из 60% отходов обогащения Балхашского ГОК и 40% микрокремнезёма составляет 48 мг/г. Введение в состав отходов обогащения Балхашского ГОК 40% микрокремнезёма повышает пуццолановую активность комплексной добавки в 2 раза.

3. Выбран оптимальный состав комплексной минеральной добавки: 60% отходы обогащения Балхашского ГОК + 40% микрокремнезем. Установлено, что повышение количества микрокремнезёма более 40% в составе комплексной добавки приведет к увеличению водопотребности смеси.

4. Оптимальная дозировка в состав цемента комплексной минеральной добавки с отходами обогащения Балхашского горно-обогатительного комбината составляет 20%. Дальнейшее увеличение количества микрокремнезёма в составе бетона могут вызывать большие усадочные напряжения. Усадочные трещины в бетоне на контакте с заполнителем и в самом цементном камне могут снизить морозостойкость и послужить очагами коррозии бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Berdov, G. I., Nikonenko, N. I., & Mashkin, A. N.** (2014). Increasing the strength of fine cement materials by introducing man-made mineral microfillers. [Povyshenie prochnosti materialov iz tonkodispersnogo cementa vvedeniem tehnogennykh mineralnykh mikronapolnitelei]. *Building materials*, 5, 52-55. (in Russ.).
2. **Guvalov, A. A., Abbasova, S. I., Kuznecova, T. V.** (2017). The effectiveness of modifiers in regulating the properties of concrete mixtures. [Effectivnost modifikatorov v regulirovanii svoistv betonnykh smesei]. *Stroitelnyie materialy*, 7, 49-51. (InRuss).
3. **GOST 22266-2013** (2013). Sulfate-resistant cements. Specifications [GOST 22266-2013 Cementy sulfatostoikie. Tehnicheskie usloviya]. (InRuss).
4. **GOST 25094-2015** Active mineral additives for cements. Activity detection method [GOST 25094-2015 Dobavki aktivnye mineralnye dlya cementov. Metod opredeleniya aktivnosti]. (InRuss).
5. **Mencher, E. M., Shafet, A. I.** (1971). Recommendations for the mathematical description of empirical one-factor dependencies. [Recomendacii po matematicheskomu opisaniyu empiricheskikh odnofactorynykh zavisimostei]. *Tolyatti*, 118. (InRuss).
6. **Nalimov, V. V., & Mulchenko, Z. M.** (1969). *Naukometriya, the Study of the Development of Science as an Information* [Naukometriya, izuchenie razvitiya nauki kak informacionnogo]. Process. Nauka: Moscow, Russia. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05262-y> (In Russ.).
7. **Pshenichnyi, G. N.** (2019). *Building materials and products: activated concrete technology: study guide* [Stroitelnye materialy i izdeliya: tehnologiya aktivirovannykh betonov: ucheb. pos.]. Moscow, Yurait. (InRuss).
8. **Singh, N. B., Meenu, K., & Saxena, S. K.** (2017) *Nanoscience of Cement and Concrete. Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5478-5487. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.003>
9. **Shpynova, L. G., Chih, V. I.** (1978). The relationship between the microstructures of clinker and cement powder and stone. [Vzaimosvyaz microstructur clincera I cementnogo poroshka I camnya]. *Cement*, 3, 6-8. (InRuss).
10. **Slavcheva, G. S., Artamonova, O. V., Shvedova, M. A., & Khan, M. A.** (2020). Clinkerless slag-silica binder: hydration process and hardening kinetics (part 2). *Magazine of Civil Engineering*, 5(97), 9712. <https://doi.org.10.18720/MCE.97.12>
11. **Zhakupbekov, S. K., & Shaltabayeva S. T.** (2009) The effect of modified additives on the

- properties of binders and concrete. [Vliyanie modificirovannyh dobavok na svoistva vyazhishih veshestv I betona]. Bulletin of NIIstromproekt, 5-6(20), 88-91. (InRuss).
12. **Zhilkeyeva, A. M.** (2021). Technological ways to increase the activity of mineral additives. [Tehnologicheskie sposoby povysheniya aktivnosti mineralnyh dobavok]. Modern science and young scientists: collection of articles of the 5th International Scientific and Practical conference, Penza, 36-36. (in Russ.).
  13. **Zhilkeyeva, A. M., & Yestemessova, A. S.** (2020). Studies of the hardening and structuring of concrete using modified binders. [Issledovaniya processa tverdeniua I structuroobrazovaniya betona s ispolzovaniem modificirovannyh vyazhushih veshestv]. Bulletin of KazLACA, 4(78), 163-167. (In Russ.).
  14. **Zhakebekov, S. K., Yestemessova, A. S., & Zhilkeyeva, A. M.** (2021). Physico-mechanical properties of heavy concrete with a complex mineral additive. The Scientific Journal of the Modern Education & Research Institute 16, 71-76.
  15. **Zhilkeyeva, A. M, Yestemessova, A. S., Zhakebekov, S. K. & Matveeva, L.** (2022). Structural characteristics and performance of concrete with a composite modifying additive. Architectura and Engineering 7(2), 86-95. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-2-86-95>