

УДК 666.94-16

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN ztwcmw

DOI 10.62980/2076-0655-2025-173-183

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕМЕНТОВ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Храмцов А.Б.¹, Урханова Л.А.², Вайнбергер С.А.³, Вайнбергер А.О.⁴

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия

³ ТОО «SV Lab», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

⁴ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований по получению цементов низкой водопотребности (ЦНВ) с использованием сырьевых материалов Республики Казахстан: кондиционного и некондиционного клинкера производства ТОО «Бухтарминская цементная компания», золошлаковых отходов Усть-Каменогорской ТЭЦ, доменных гранулированных шлаков Усть-Каменогорского и Карагандинского металлургических комбинатов. ЦНВ получали совместным помолом цементного клинкера, гипсового камня, отходов промышленности и суперпластификатора на основе поликарбоксилатов до удельной поверхности 450–550 м²/кг в вибрационной мельнице. Обоснован выбор техногенных отходов различного состава в качестве наполнителя при получении ЦНВ и показано, что их применение позволяет утилизировать крупнотоннажные промышленные отходы с получением вяжущих веществ с прочностью, не уступающую прочности промышленного цемента. Установлены зависимости физико-механических показателей ЦНВ от количества наполнителей, тонкости помола вяжущих веществ, расхода суперпластификатора. Тонкое измельчение компонентов в присутствии сухого суперпластификатора позволило получить ЦНВ 70, ЦНВ 50 с прочностью при сжатии 50–70 МПа. Исследования показали возможность использования некондиционного клинкера, образуемого на цементном заводе в результате нарушения технологических процессов и складированного в отвалы, либо частично добавляемого в мельницу помола цемента, что ухудшает его качество, для получения ЦНВ: установлено оптимальное соотношение кондиционного и некондиционного клинкера. Доказано использование до 35% в составе ЦНВ некондиционного клинкера, с применением которого получены цементы низкой водопотребности с прочностью 45–55 МПа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементы низкой водопотребности, промышленные отходы, золошлаковые отходы, доменный гранулированный шлак, степень дисперсности, удельная поверхность, некондиционный клинкер, прочность при сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Храмцов А.Б., Урханова Л.А., Вайнбергер С.А., Вайнбергер А.О. Исследование возможности получения цементов низкой водопотребности на основе промышленных отходов республики Казахстан // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 173–183. DOI 10.62980/2076-0655-2025-173-183, EDN ztwcmw

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

QH MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES

EDN ztwcmw

DOI 10.62980/2076-0655-2025-173-183

STUDY ON THE POSSIBILITY OF OBTAINING LOW-WATER-DEMAND CEMENTS BASED ON INDUSTRIAL WASTE FROM THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Khramtsov A.B.¹, Urkhanova L.A.², Vainberger S.A.³, Vainberger A.O.⁴

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

³ LLP "SV Lab", Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

⁴ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

The article presents the results of research on the production of low-water-demand cements (LWDC) using raw materials from the Republic of Kazakhstan: conditioned and unconditioned clinker from LLP "Bukhtarma Cement Company," fly ash and slag waste from the Ust-Kamenogorsk CHP plant, and granulated blast furnace slags from the Ust-Kamenogorsk and Karaganda metallurgical plants. LWDC was produced by jointly grinding cement clinker, gypsum stone, industrial waste, and a polycarboxylate-based superplasticizer to a specific surface area of 450–550 m²/kg in a vibratory mill. The choice of industrial waste of various compositions as fillers for LWDC production is substantiated, demonstrating that their use allows for the utilization of large-tonnage industrial waste while obtaining binders with strength comparable to that of industrial cement. Physical and mechanical indicators of LWDC were found to depend on the filler amount, fineness of binder grinding, and superplasticizer consumption. Fine grinding of components in the presence of a dry superplasticizer made it possible to produce LWDC 70 and LWDC 50 with compressive strengths of 50–70 MPa. The research demonstrated the possibility of using unconditioned clinker, which is formed at the cement plant as a result of technological process violations and is either stockpiled or partially added to the cement grinding mill, thereby deteriorating its quality, for LWDC production. The optimal ratio of conditioned and unconditioned clinker was established. It was shown that up to 35% of unconditioned clinker can be used in LWDC composition, producing low-water-demand cements with compressive strengths of 45–55 MPa.

KEY WORDS: low-water-demand cements, industrial waste, fly ash and slag waste, granulated blast furnace slag, dispersion degree, specific surface area, unconditioned clinker, compressive strength

FOR CITATION: Khramtsov A.B., Urkhanova L.A., Vainberger S.A., Vainberger A.O. Study on the possibility of obtaining low-water-demand cements based on industrial waste from the republic of Kazakhstan // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No-2. – Pp. 173 –183. DOI 10.62980/2076-0655-2025-173-183, EDN ztwcmw

ВВЕДЕНИЕ

В середине XX века в научной среде начали обсуждать принципы замкнутых производственных циклов, где отходы одной отрасли становятся сырьём для другой. Эта идея, позднее развитая в рамках теорий циклической экономики, например, в работах У. Стахела [1] и Д. Пирса [2], легла в основу современных подходов к ресурсоэффективности. Внедрение рециклинга в производство строительных материалов не только снижает нагрузку на природные ресурсы, но и создаёт синергию между различными секторами экономики [3,4]. Этот подход соответствует принципам «зелёной» химии и концепции «ноль отходов», где каждый побочный продукт находит применение в новых технологических цепочках, формируя устойчивую модель развития как на региональном, так и на глобальном уровне.

В Республике Казахстан (РК) основные промышленные отходы образуются от функционирования предприятий металлургического и энергетического комплекса, горнодобывающей и химической промышленности. Несмотря на предпринимаемые меры по сокращению отходов, наносящих ущерб окружающей среде, процент их использования в различных отраслях экономики для производства конечной продукции остается на низком уровне – до 10%. В основном отходы вывозятся в отвалы в виде пород вскрыши, хвостов обогащения и металлургических шлаков, все больше накапливаясь там и занимая значительные территории. Причем большая часть отходов (57,6%) приходится на цветную и черную металлургию, соответственно 38,9 и 23,7% [5].

От тепловых электростанций (ТЭС), работающих на угле и вырабатывающих около 70-75% электроэнергии, ежегодно образуется более 10 – 15 млн т золошлаковых отходов. Только в северных регионах РК, где расположены крупнейшие угольные ТЭС, такие как Экибастузские ГРЭС-1 и ГРЭС-2, скопилось в золоотвалах более 10-20 млн. т золошковых отходов.

Использование отходов металлургического комплекса, в частности отходов черной металлургии, и золошлаковых отходов ТЭС Казахстана в производстве строительных материалов является *стратегически целесообразным* решением с экологической, экономической и ресурсосберегающей точек зрения [6-12]. Одним из перспективных направлений использования этих отходов является производство цемента низкой водопотребности (ЦНВ), являющихся разновидностью композиционных цементных вяжущих и научно-технологические основы которых были заложены советскими учеными ещё в 80-90^х годах прошлого века [13-17]. Главными достоинствами технологии ЦНВ является безотходность, сбережение запасов ценного природного сырья, а также «всеядность», обусловленная возможностью использования разнообразных отходов и нерудных ископаемых как активных компонентов вяжущего. При этом в атмосферу не выбрасываются ни углекислый газ, ни пыль, как это происходит при производстве портландцемента [13].

На ряде цементных заводов в результате нарушения технологических процессов образуется некондиционный портландцементный клинкер (НПК), складываемый в отвалы, либо частично добавляемый в мельницу помола цемента для получения портландцемента с более низкими

INTRODUCTION

In the mid-20th century, the scientific community began discussing the principles of closed production cycles, where waste from one industry becomes raw material for another. This idea, later developed within the frameworks of circular economy theories, such as the works of W. Stahel [1] and D. Pearce [2], formed the foundation of modern approaches to resource efficiency. Recycling integration into construction material production not only reduces the burden on natural resources but also creates synergy between different economic sectors [3,4]. This approach aligns with the principles of green chemistry and the zero-waste concept, where every byproduct finds application in new technological chains, forming a sustainable development model on both regional and global levels.

In the Republic of Kazakhstan (RK), the primary industrial wastes are generated by enterprises of the metallurgical and energy sectors, as well as the mining and chemical industries. Despite measures to reduce environmentally harmful waste, the percentage of their utilization in various economic sectors for the production of end products remains low—up to 10%. Most of the waste is disposed of in dumps in the form of overburden rocks, beneficiation tailings, and metallurgical slags, continually accumulating and occupying significant areas. The majority of waste (57.6%) is from ferrous and non-ferrous metallurgy, accounting for 38.9% and 23.7%, respectively [5].

Thermal power plants (TPPs) operating on coal, which generate approximately 70–75% of electricity, annually produce more than 10–15 million tons of fly ash and slag waste. Only in the northern regions of RK, where major coal-fired TPPs, such as Ekibastuz GRES-1 and GRES-2, are located, over 10–20 million tons of fly ash waste have accumulated in ash disposal sites.

The utilization of waste from the metallurgical sector, particularly ferrous metallurgy waste, and fly ash and slag waste from Kazakhstan's TPPs in construction material production is a strategically feasible solution from environmental, economic, and resource-saving perspectives [6-12]. One promising direction for utilizing this waste is the production of low-water-demand cements (LWDC), a type of composite cement binder whose scientific and technological foundations were established by Soviet scientists in the 1980s–1990s [13-17]. The main advantages of LWDC technology include waste-free production, conservation of valuable natural raw materials, and its "universality," characterized by the ability to use various waste types and non-metallic minerals as active components of the binder. Additionally, no carbon dioxide or dust is emitted into the atmosphere, as is the case with Portland cement production [13].

At several cement plants, technological process violations result in the formation of unconditioned Portland cement clinker (UPC), which is either stockpiled or partially added to the cement grinding mill to produce Portland cement with lower strength characteristics. This cement is distributed to consumers for the production of mortars and concretes with low physical and mechanical properties [18]. The formation of unconditioned clinker is caused by the variability in the chemical and mineralogical composition of raw materials for clinker

показателями по прочности и отпускаемого потребителям для производства растворов и бетонов с невысокими физико-механическими показателями [18]. Получение некондиционного клинкера обусловлено непостоянством химико-минералогического состава исходных сырьевых материалов для получения клинкера не только в пределах одного месторождения, но и в пределах одной партии [19-21].

В настоящей работе проведена оценка пригодности применения отходов промышленности РК: золы, доменного гранулированного шлака, а также некондиционного портландцементного клинкера в качестве компонентов при получении цемента низкой водопотребности.

Материалы и методы исследований

Для исследования возможности получения ЦНВ с использованием отходов промышленности Республики Казахстан использовали портландцементный клинкер (ПЦК) производства ТОО «Бухтарминская цементная компания», зола (зола-уноса) ТОО «Усть-Каменогорской ТЭЦ», доменный гранулированный шлак АО «Qarmet», гипсовый камень ТОО «Кнауф Гипс Тараз» (Улькен-Бурултауское месторождение), химический состав которых представлен в таблице 1. Минералогический состав портландцементного клинкера представлен в таблице 2.

production, not only within one deposit but also within a single batch [19-21].

This study evaluates the feasibility of using industrial waste from RK, including fly ash, granulated blast furnace slag, and unconditioned Portland cement clinker, as components for the production of low-water-demand cements.

Materials and Methods

To explore the feasibility of producing low-water-demand cements (LWDC) using industrial waste from the Republic of Kazakhstan, the following materials were used: Portland cement clinker (PCC) produced by LLP "Bukhtarma Cement Company," fly ash (fly ash residue) from LLP "Ust-Kamenogorsk CHP," granulated blast furnace slag from JSC "Qarmet," and gypsum stone from LLP "Knauf Gypsum Taraz" (Ulken-Burultau deposit). Their chemical compositions are presented in Table 1, and the mineralogical composition of the Portland cement clinker is shown in Table 2.

ТАБЛИЦА 1 УСРЕДНЕННЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦНВ, мас. %.

Table 1 Average Chemical Composition of Raw Materials for LWDC Production, wt. %.

Материал Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Портландцементный клинкер Portland cement clinker	20,10	4,80	5,23	65,11	1,30	0,85	0,87	0,52	0,17
Некондиционный ПЦК Unconditioned Portland cement clinker	21,02	5,37	4,29	64,58	1,31	0,55	0,89	0,54	0,56
Гипсовый камень Gypsum stone	4,36	0,63	0,38	31,06	2,69	36,33	-	-	23,1
Зола Fly ash	62,66	17,71	5,87	3,02	2,65	0,59	0,91	1,07	0,06
Доменный гранулированный шлак Granulated blast furnace slag	35,31	14,86	0,21	38,67	10,01	0,31	-	-	0,22

ТАБЛИЦА 2 МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА ТОО «Бухтарминская цементная компания»

Table 2 Mineralogical Composition of Portland Cement Clinker from LLP "Bukhtarma Cement Company."

Вид портландцементного клинкера Type of Portland Cement Clinker	Содержание основных минералов, в мас. %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Обычный (ПЦК) Standard (PCC)	70,31	14,43	3,85	15,90
Некондиционный (НПЦК) Unconditioned (UPCC)	60,75	4,58	6,95	13,04

Анализ параметров состояния и гранулометрического состава золошлаковой смеси, образуемой при сжигании каменного угля Кара-Жира, показывает, что состав золы представлен преимущественно мелкими частицами, размером 0,14 мм и меньше, и она характеризуется значительной пустотностью (табл. 3).

Analysis of the condition parameters and granulometric composition of the fly ash and slag mixture, formed during the combustion of Kara-Zhyra coal, indicates that the ash is predominantly composed of fine particles, measuring 0.14 mm or smaller, and is characterized by significant porosity (Table 3).

Таблица 3. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ЗОЛОШЛАКОВОЙ СМЕСИ

Table 3. Condition Parameters and Granulometric Composition of the Fly Ash and Slag Mixture.

Наименование показателей Name of Indicators	Фактические величины показателей Actual Values of Indicators
Истинная плотность, г/см ³ True Density, g/cm ³	2,1
Удельная поверхность, см ² /г Specific Surface Area, cm ² /g	1280
Насыпная плотность, г/см ³ Bulk Density, g/cm ³	0,76
Пустотность, % Porosity, %	63,8
Полные остатки, в %, на ситах (мм) Total Residues, %, on Sieves (mm)	-
20	
10	
5	
2,5	
1,25	
0,63	
0,315	
0,14	
менее 0,14	
Остаток на сите № 008 Residue on Sieve No. 008	5,6 %.
Модуль крупности Fineness Modulus	0,91

Гипсовый камень II сорта Улькен-Бурултауского месторождения фракции 0-30 мм, вводили в количестве 2,1 % в пересчете на SO₃.

В качестве поверхностно-активных веществ применялись суперпластификаторы ФОРТ УП-2М и Диосил, производимые на основе модифицированных поликарбоксилатов отечественной компанией ООО «ФОРТ». Количество суперпластификаторов варьировалось от 1 до 4 % от массы вяжущего.

Для некондиционного клинкера характерно повышенное содержание двухкальциевого силиката, что должно приводит к снижению скорости набора прочности цемента на основе такого клинкера в ранние сроки твердения – 1- 3 суток твердения. Следует предположить, что тонкое измельчение компонентов вяжущего должно ускорить процесс их твердения, что характерно при получении ЦНВ.

Анализ химического состава золы показал, что отходы имеют потенциал для применения в составе ЦНВ благодаря высокому содержанию оксидов SiO₂ и Al₂O₃. Пуццоланическая активность золы по количеству поглощенного CaO из насыщенного раствора гидроксида кальция по ГОСТ 25592-2019 - 35 мг CaO/г золы, что соответствует активным минеральным добавкам со средними пуццоланическими свойствами.

Доменный гранулированный шлак (ДГШ) АО «Qarmet» - сыпучий материал серого цвета. Средний модуль основности ДГШ составляет 0,96, что соответствует шлаку кислому, близкому к нейтральному. Диапазон возможного колебания значений модуля основности от 0,90 до 0,98. Коэффициент качества при MgO >10% составляет 1,8. По этому показателю в соответствии с ГОСТ 3476 шлак относится к 1 сорту и соответствует требованиям EN 197-1. При быстром охлаждении шлакового расплава в процессе его грануляции

Grade II gypsum stone from the Ulken-Burultau deposit (0-30 mm fraction) was introduced in an amount of 2.1% recalculated to SO₃ content.

The surfactants used were superplasticizers FORT UP-2M and Diosil, produced by the domestic company LLC "FORT" based on modified polycarboxylates. The superplasticizer dosage ranged from 1% to 4% by the binder mass.

Unconditioned clinker is characterized by an increased content of dicalcium silicate, which is expected to reduce the early strength gain (1–3 days of curing) of cement based on such clinker. It can be assumed that fine grinding of the binder components should accelerate their hardening process, as is typical for LWDC production.

The analysis of the chemical composition of ash showed that the waste has a potential for use in CNF composition due to the high content of oxides SiO₂ and Al₂O₃. Pozzolan activity of ash by the amount of absorbed CaO from saturated solution of calcium hydroxide according to GOST 25592-2019 is 35 mg CaO/g ash, which corresponds to active mineral additives with medium pozzolan properties.

Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) from JSC "Qarmet" is a loose gray-colored material. The average basicity modulus of the GBFS is 0.96, which classifies it as an acidic slag, close to neutral. The possible range of basicity modulus values varies from 0.90 to 0.98. The quality coefficient, at MgO >10%, is 1.8. According to this indicator and in compliance with GOST 3476, the slag belongs to Grade 1 and meets the requirements of EN 197-1. During the rapid cooling of the slag melt in the granulation process, the glass phase content reaches 65–97% (see Fig. 1). Thus, based on its chemical composition and studied microstructure, GBFS is classified as slag with excellent hydraulic properties.

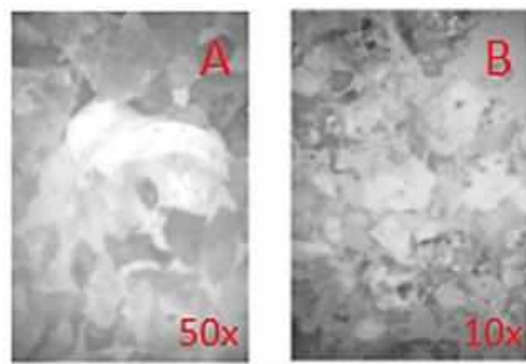
содержание стеклофазы достигает 65-97% (рис. 1). Таким образом, по химическому составу и исследуемой микроструктуре ДГШ относится к шлаку с хорошими гидравлическими свойствами.

РИСУНОК 1

МИКРОФОТОГРАФИИ ДОМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА
АО «Qarmet».

Figure 1

Microphotographs of Granulated Blast Furnace Slag from JSC "Qarmet".



Исходные сырьевые материалы (зола, доменный гранулированный шлак) предварительно сушились в сушильном шкафу. Для получения ЦНВ портландцементный клинкер – обычный и некондиционный, гипсовый камень сначала подвергались дроблению, затем измельчались совместно с золой либо с доменным гранулированным шлаком в лабораторной двухкамерной вибрационной мельнице периодического действия типа СВУ-2 производства Усть-Каменогорской компании ТОО «ВИБРОМАШ УК» конструкции Ковшика А.В. (рис. 2), до достижения удельной поверхности не менее 4500 см²/г в зависимости от состава цемента. Зола и ДГШ вводили в количестве 30-70% от массы клинкера. В составе ЦНВ без наполнителей использование НППК составляло от 0 до 50 %. Содержание НППК в составе ЦНВ-30, ЦНВ-50 и ЦНВ-70 с наполнителями (зола либо доменный гранулированный шлак) варьировалось от 9% до 35%. Количество суперпластификатора, рекомендованное производителем – в пределах 1-4%.

В используемом помольном агрегате механические воздействия на измельчаемый материал - удар и истирание. Корпус установлен на ряд вертикальных спиральных пружин, расположенных по периметру барабана и посаженных на штыри, закрепленные на раме мельницы. Созданная таким образом из пружин упругая система обеспечивает свободу колебания корпуса и препятствует передаче вибрации основанию установки. Мелющими телами служат стальные ролики.

The raw materials (fly ash and granulated blast furnace slag) were pre-dried in a drying oven. For the production of LWDC, Portland cement clinker—both standard and unconditioned—and gypsum stone were first crushed, then ground together with fly ash or granulated blast furnace slag in a two-chamber laboratory vibratory mill of periodic action, model SVU-2, manufactured by the Ust-Kamenogorsk company LLP "VIBROMASH UK," designed by A.V. Kovshik (see Fig. 2). The grinding was carried out until a specific surface area of at least 4500 cm²/g was achieved, depending on the cement composition. Fly ash and GBFS were added in quantities ranging from 30% to 70% of the clinker mass. In LWDC compositions without fillers, the proportion of unconditioned clinker (UPC) ranged from 0% to 50%. In LWDC compositions with fillers (fly ash or granulated blast furnace slag), designated as LWDC-30, LWDC-50, and LWDC-70, the content of UPC varied from 9% to 35%. The recommended amount of superplasticizer, as advised by the manufacturer, ranged between 1% and 4%.

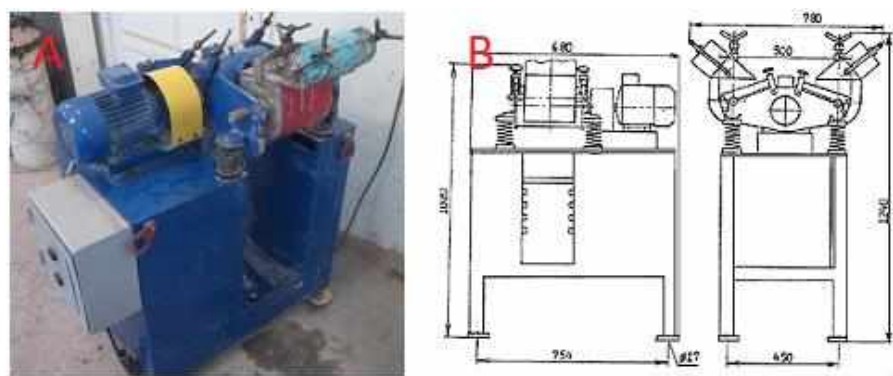
The grinding equipment employed applied mechanical impacts to the materials being ground—through both impact and abrasion. The mill body was mounted on a series of vertical spiral springs arranged around the drum's perimeter and seated on studs fixed to the mill frame. This spring system created an elastic suspension that allowed the mill body to oscillate freely while preventing vibrations from being transmitted to the installation's base. Steel rollers were used as grinding media.

РИСУНОК 2

ВИБРОМЕЛЬНИЦА СВУ-2

Figure 1

Vibratory Mill UVS-2



Степень дисперсности ЦНВ оценивали методом воздухопроницаемости через слой материала на приборе ПСХ-10А.

Из вяжущих различной степени дисперсности изготавливались и испытывались образцы пластичного формования размером 2х2х2 см по методу ЦНИПС-2, при нормальной густоте 0,27-0,31.

Для определения прочности изготавливались 12 образцов (две серии по 6 образцов). Первые 20 часов после изготовления все образцы твердели в помещении при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 95-100%. Затем одну форму (шесть образцов) помещали в пропарочную камеру и подвергали ее 6-и часовому прогреву над кипящей водой, после чего образцы 1 час остывали. После этого две серии образцов испытывали на испытательной машине на прочность при сжатии. Для каждой серии вычисляли средний предел прочности при сжатии, определяли коэффициент эффективности пропаривания цемента, а затем по графику находили переходной коэффициент К от результатов ускоренного определения активности цемента к результатам стандартных 28-суточных испытаний.

Для подбора количества пластификатора и его влияния на процесс помола золы были проведены исследования по определению её размолоспособности.

Результаты и обсуждение

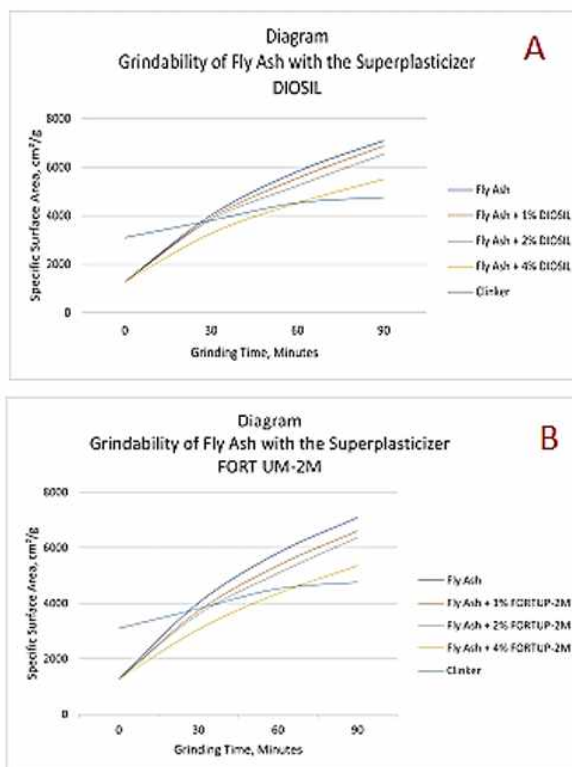
На рисунке 3 представлены кинетические кривые помола портландцементного клинкера, золы, золы и пластификаторов (ФОРТ УП-2М и Диосил).

РИСУНОК 3

КРИВЫЕ РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЦНВ

Figure 3

Grindability Curves of Materials for LWDC



Анализ результатов определения размолоспособности компонентов для ЦНВ показывает, что вид кривых идентичен, проявляется лишь различие в размолоспособности: размалывание золы происходит более эффективно, чем размалывание портландцементного

The dispersion degree of LWDC was assessed using the air permeability method on a PSKh-10A device. Samples of plastic molding measuring 2x2x2 cm were prepared and tested from binders with varying degrees of dispersion, following the TSNIIPS-2 method, with a normal consistency of 0.27–0.31.

To determine strength, 12 samples (two series of six samples each) were fabricated. For the first 20 hours after preparation, all samples were cured in a room at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative humidity of 95–100%. Subsequently, one mold (six samples) was placed in a steaming chamber and subjected to six hours of heating above boiling water, after which the samples were cooled for one hour. Afterward, the two series of samples were tested on a testing machine for compressive strength. For each series, the average compressive strength was calculated, the cement steaming efficiency coefficient was determined, and a transition coefficient, K, was identified from the graph to correlate accelerated cement activity determination results with standard 28-day testing results.

To optimize the superplasticizer dosage and evaluate its effect on fly ash grinding, studies were conducted to determine its grindability.

Results and Discussion

Figure 3 illustrates the kinetic grinding curves of Portland cement clinker, fly ash, and fly ash with superplasticizers (FORT UP-2M and Diosil).

The analysis of the grindability results for LWDC components shows that the shape of the curves is identical, with only differences in grindability observed: the grinding of fly ash is more efficient than that of Portland cement clinker. The addition of superplasticizers slightly reduces the

клинкера. При добавлении пластификаторов размолоспособность золы незначительно снижается. Возможно, этот эффект связан с тем, что при помоле в вибрационной мельнице происходит разогрев материала до 70 °С, что приводит к размягчению суперпластификатора на поликарбоксилатной основе и, вследствие этого, к агрегации частиц золы, что затрудняет помол. Сравнение размолоспособности золы в присутствии суперпластификатора Диосил показывает лучшие результаты, в отличие от помола с суперпластификатором ФОРТ УП-2М: сокращается время помола и, соответственно, энергетические затраты при одинаковой тонкости помола. В дальнейшем для получения ЦНВ использовали суперпластификатор Диосил.

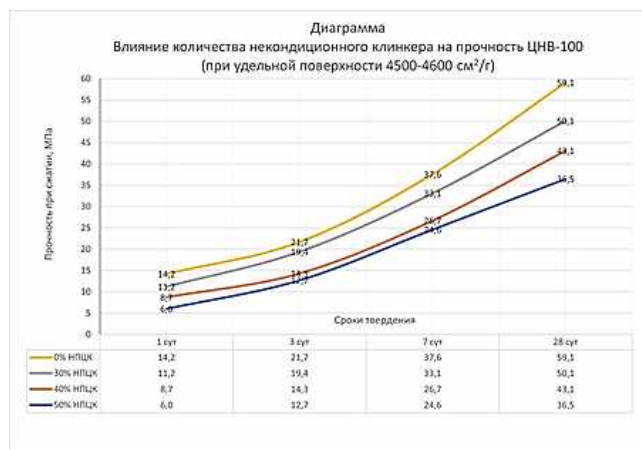
Замена в составе ЦНВ100 клинкера на некондиционный клинкер до 50% показывает замедление процессов твердения цемента в 1-7 суток и уменьшение прочности в 28 суток твердения в среднем на 20-30% (рис. 4). Вероятной причиной этого эффекта является уменьшение содержания количества основного минерала ПЦК - C_3S , или имеются дефекты структуры, что замедляет гидратацию и образование прочных гидратных фаз (CSH-гель). Следует отметить, что наибольший прирост прочности гидратного камня для всех вяжущих происходит между 7 и 28 сутками твердения.

РИСУНОК 4

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА НПЦК НА ПРОЧНОСТЬ ЦНВ-100
(удельная поверхность 4500–4600 cm^2/g)

Figure 4

Effect of the Amount of Unconditioned Portland Cement Clinker (UPC) on the Strength of LWDC-100
(Specific Surface Area 4500–4600 cm^2/g).



Результаты исследований по влиянию вида и количества введенного наполнителя на набор прочности и марочную прочность составов с ПЦК, с содержанием НПЦК в количестве 30, 40 и 50%, при замесах с нормальной густотой 27-31% показано в таблицах 4-7.

Анализ полученных данных показывает, что использование золы как наполнителя положительно воздействует на размалываемость вяжущих, сокращая время помола вяжущего. Положительное влияние золы обусловлено её высокой исходной дисперсностью.

Цементы с добавкой шлака размалываются хуже за счет его твердости: для достижения требуемой тонкости помола вяжущих с добавкой шлака необходим более продолжительный помол. Водопотребность с суперпластификатором закономерно уменьшается, но различие в изменении этого показателя для ЦНВ с разными наполнителями и видом используемого клинкера возрастает.

При замене ПЦК на некондиционный клинкер в количестве 30% прочность цементов уменьшилась на 15%, на 40% - на 27%, на 50% - снижение прочности составило 38%.

grindability of fly ash. This effect may be due to the heating of the material up to 70°C during grinding in the vibratory mill, leading to the softening of the polycarboxylate-based superplasticizer and, as a result, the aggregation of fly ash particles, which complicates the grinding process. A comparison of fly ash grindability in the presence of the superplasticizer Diosil shows better results compared to grinding with the superplasticizer FORT UP-2M: grinding time is reduced, and energy costs are lowered at the same level of grinding fineness. Consequently, the superplasticizer Diosil was used for further LWDC production.

Replacing up to 50% of clinker in the LWDC100 composition with unconditioned clinker results in a slowdown of cement hardening processes during the first 1–7 days and a reduction in strength at 28 days of hardening by an average of 20–30% (see Fig. 4). This effect is likely caused by a decrease in the content of the primary mineral in PCC— C_3S —or structural defects that slow down hydration and the formation of strong hydrated phases (CSH gel). It should be noted that the greatest increase in the strength of the hydrated stone for all binders occurs between 7 and 28 days of hardening.

The results of studies on the effect of the type and amount of added filler on the strength development and grade strength of compositions with PCC, containing 30%, 40%, and 50% of unconditioned Portland cement clinker (UPC), with normal consistency ranging from 27% to 31%, are presented in Tables 4–7.

The analysis of the obtained data indicates that using fly ash as a filler positively affects the grindability of binders, reducing the grinding time. This positive influence of fly ash is attributed to its high initial dispersion. Cements with slag additives exhibit lower grindability due to the hardness of the slag: achieving the required fineness of binders with slag additives necessitates prolonged grinding. Water demand with a superplasticizer consistently decreases, but the variation in this parameter for LWDC with different fillers and types of clinker increases.

Replacing PCC with unconditioned clinker (UPC) at 30% resulted in a 15% reduction in cement strength, at 40% - a 27% reduction, and at 50% - a 38% reduction in strength.

Таблица 4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦНВ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОБЫЧНОМ ПЦК
Table 4. Physical and Mechanical Properties of LWDC Obtained Using Standard PCC

Составы Compositions	Нормальная густота, % Normal Consistency, %	Удельная поверхность, см ² /г Specific Surface Area, cm ² /g	Прочность при сжатии, МПа, после твердения, сутки Compressive Strength, MPa, After Hardening (Days)			
			1	3	7	28
ЦНВ 70 (зола) LWDC 70 (Fly ash)	27	4525	12,1	25,3	43,5	60,7
ЦНВ 50 (зола) WDC 50 (Fly ash)	31	4894	8,1	15,2	30,4	53,5
ЦНВ 30 (зола) LWDC 30 (Fly ash)	28	5218	5,7	10,1	20,3	45,4
ЦНВ70 (ДГШ) LWDC 70 (GBFS)	27	4611	14,2	29,6	53,2	62,4
ЦНВ50 (ДГШ) LWDC 50 (GBFS)	27	4513	10,4	19,5	48,9	67,2
ЦНВ30 (ДГШ) LWDC 30 (GBFS)	29	5508	7,9	13,9	38,0	64,1

Таблица 5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦНВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ 50% НЕКОНДИЦИОННОГО КЛИНКЕРА
Table 5. Physical and Mechanical Properties of LWDC Obtained with the Addition of 50% Unconditioned Clinker

Составы Compositions	Нормальная густота, % Normal Consistency, %	Удельная поверхность, см ² /г Specific Surface Area, cm ² /g	Прочность при сжатии, МПа, после твердения, сутки Compressive Strength, MPa, After Hardening (Days)			
			1	3	7	28
ЦНВ 70 (зола) LWDC 70 (Fly ash)	27	4682	10,1	20,3	38,4	50,6
ЦНВ 50 (зола) WDC 50 (Fly ash)	31	5051	6,8	12,2	25,3	40,5
ЦНВ 30 (зола) LWDC 30 (Fly ash)	27	5630	4,6	8,1	15,2	32,6
ЦНВ70 (ДГШ) LWDC 70 (GBFS)	30	4504	11,8	23,8	44,9	59,2
ЦНВ50 (ДГШ) LWDC 50 (GBFS)	30	4871	8,7	15,6	38,4	61,8
ЦНВ30 (ДГШ) LWDC 30 (GBFS)	27	5210	6,3	11,2	27,2	54,9

Таблица 6. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦНВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ 40% НЕКОНДИЦИОННОГО КЛИНКЕРА
Table 6. Physical and Mechanical Properties of LWDC Obtained with the Addition of 40% Unconditioned Clinker

Составы Compositions	Нормальная густота, % Normal Consistency, %	Удельная поверхность, см ² /г Specific Surface Area, cm ² /g	Прочность при сжатии, МПа, после твердения, сутки Compressive Strength, MPa, After Hardening (Days)			
			1	3	7	28
ЦНВ 70 (зола) LWDC 70 (Fly ash)	28	4821	10,1	22,3	38,4	55,6
ЦНВ 50 (зола) WDC 50 (Fly ash)	29	4921	7,9	15,2	28,3	47,3
ЦНВ 30 (зола) LWDC 30 (Fly ash)	31	5781	5,7	10,1	20,2	34,7
ЦНВ70 (ДГШ) LWDC 70 (GBFS)	29	4609	11,8	26,1	44,9	64,9
ЦНВ50 (ДГШ) LWDC 50 (GBFS)	29	4518	10,1	19,5	36,2	62,2
ЦНВ30 (ДГШ) LWDC 30 (GBFS)	31	5228	7,9	13,9	31,9	58,8

Таблица 7. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦНВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ 30% НЕКОНДИЦИОННОГО КЛИНКЕРА

Table 7. Physical and Mechanical Properties of LWDC Obtained with the Addition of 30% Unconditioned Clinker

Составы Compositions	Нормальная густота, % Normal Consistency, %	Удельная поверхность, см ² /г Specific Surface Area, cm ² /g	Прочность при сжатии, МПа, после твердения, сутки Compressive Strength, MPa, After Hardening (Days)			
			1	3	7	28
ЦНВ 70 (зола) LWDC 70 (Fly ash)	31	4570	13,7	31,9	45,5	63,7
ЦНВ 50 (зола) WDC 50 (Fly ash)	29	4912	11,0	22,8	31,9	52,5
ЦНВ 30 (зола) LWDC 30 (Fly ash)	31	5416	7,9	14,7	24,5	39,3
ЦНВ70 (ДГШ) LWDC 70 (GBFS)	29	4632	16,0	37,3	53,3	71,6
ЦНВ50 (ДГШ) LWDC 50 (GBFS)	30	4754	14,1	29,1	40,8	66,3
ЦНВ30 (ДГШ) LWDC 30 (GBFS)	30	5181	10,8	20,3	33,9	62,3

На основании проведённых исследований установлено, что использование золы (золы-уноса) и доменного гранулированного шлака оказывает значительное влияние на прочностные характеристики цементных материалов. Оценка их эффективности была выполнена с учётом их пуццоланической и гидравлической активности, а также структурных и фазовых особенностей.

Зола-уноса характеризуется высоким содержанием оксидов кремния SiO_2 и алюминия Al_2O_3 , что определяет её высокую пуццоланическую активность. Эти компоненты, находясь преимущественно в аморфной фазе, способны взаимодействовать с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образуя дополнительные вяжущие соединения в виде CSH-гелей, что способствует улучшению механических характеристик цемента.

Замена 30% клинкера золой демонстрирует увеличение прочности на 30%, что обусловлено эффективным формированием микроструктуры матрицы. При замене 50% клинкера золой наблюдается рост прочности на 15–31%, что подтверждает способность золы частично компенсировать уменьшение содержания клинкера. Однако при замене 70% клинкера золой прочность снижается на 2–6%, что связано с уменьшением реакционной способности системы из-за избытка пуццоланического компонента.

Наибольшая эффективность достигается при замене золы в количестве 30% для составов с соотношением ПЦК: НППК = 50:50.

Шлак, как гидравлически активный компонент, обладает высоким содержанием стеклофазы (до 97%), что обуславливает его способность взаимодействовать с водой и образовывать гидратные соединения. Это свойство особенно эффективно при использовании в композиционных цементах. Замена 30% клинкера шлаком приводит к увеличению прочности на 34–79% за счёт интенсификации процессов гидратации. При замене 50% клинкера шлаком прочность возрастает на 44–79%, что связано с образованием более плотной и стабильной структуры гидратной матрицы. При увеличении замены до 70% наблюдается рост прочности на 38–66%, хотя высокая доля шлака может замедлять набор прочности на ранних стадиях.

The conducted research established that the use of fly ash (fly ash residue) and granulated blast furnace slag significantly impacts the strength characteristics of cementitious materials. Their effectiveness was evaluated considering pozzolanic and hydraulic activity as well as structural and phase features.

Fly ash residue is characterized by a high content of silicon dioxide (SiO_2) and aluminum oxide (Al_2O_3), which determines its high pozzolanic activity. These components, predominantly in an amorphous phase, can react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to form additional binding compounds in the form of CSH gels, improving the mechanical properties of cement.

Replacing 30% of clinker with fly ash demonstrates a 30% strength increase, attributed to the efficient formation of the matrix microstructure. Replacing 50% of clinker with fly ash results in a 15–31% strength gain, confirming that fly ash can partially compensate for the clinker content reduction. However, replacing 70% of clinker with fly ash causes a 2–6% strength decrease, attributed to reduced system reactivity due to an excess of the pozzolanic component. The highest efficiency is achieved with 30% fly ash replacement in compositions with a PCC:UPC ratio of 50:50.

Slag, as a hydraulically active component, has a high glass phase content (up to 97%), which facilitates its ability to interact with water and form hydrate compounds. This property is particularly effective in composite cements. Replacing 30% of clinker with slag leads to a 34–79% strength increase due to the intensification of hydration processes. Replacing 50% of clinker with slag increases strength by 44–79%, attributed to the formation of a denser and more stable hydrated matrix structure. Increasing the replacement to 70% results in a 38–66% strength increase, although a high slag content may slow down early strength development.

Maximum efficiency is observed at 50% slag replacement for compositions with a PCC:UPC ratio of 50:50.

Максимальная эффективность отмечена при замене 50% шлака для составов с соотношением ПЦК: НПЦК = 50:50.

Общие выводы

Выполненные исследования показали, что отходы промышленности Республики Казахстан имеют значительный потенциал для получения композиционных цементов – ЦНВ с улучшенными физико-механическими показателями, что повышает ресурсосберегающие и экологические показатели строительной отрасли.

Использование доменного гранулированного шлака в качестве наполнителя более эффективно по сравнению с золой, особенно при получении ЦНВ50 и ЦНВ30. Зола показывает высокую эффективность при частичной замене клинкера - до 30%, благодаря своей пуццоланической активности. Выбор компонентов для получения композиционных вяжущих зависит от проектных требований к цементной системе, включая прочностные характеристики, сроки твердения и экологические аспекты.

Благодарности

Выражаем благодарность аккредитованной строительной испытательной лаборатории ТОО «SV Lab» за предоставленную возможность выполнить экспериментальные исследования.

Литература:

1. Stahel, W.R. (1982) The product-life factor. The Woodlands, Texas.
2. Pearce, D., Markandya, A. & Barbier, E. (1990) Sustainable development economics and environment in the Third World. London: Elgar, Earthscan Publications Ltd.
3. Graedel, T.E. (2011). Recycling, Material Efficiency, and the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 317–319.
4. Lifset, R., et al. (2013). The Circular Economy and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 17(3), 324–327.
5. Шайгазиева А.Е. Управление утилизацией отходов добычи и переработки минерального сырья как важного природоохранного мероприятия // Сейфуллинские чтения – 9: новый вектор развития высшего образования и науки: материалы Республиканской научно-теоретической конференции, посвященной дню Первого Президента Республики Казахстан. – 2013. – Т.1, ч.2 – С. 147-149.
6. Трофимов Б.Я., Шулдыков К.В. О применении малоактивного доменного гранулированного шлака // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2015. №6. С.37-45.
7. Васильев, О.П. Цементы низкой водопотребности: составы и технология // Известия строительных наук. 2015. №4. С. 12–20.
8. Захаров, К.И., Соколов, А.В. Оптимизация состава цементов с низкой водопотребностью // Научные труды строительного института. 2022. №8. С. 44–50.
9. Морозов, Ю.В., Лавров, А.Г. Анализ свойств цементов низкой водопотребности // Материалы строительной индустрии. 2022. №3. С. 48–54.
10. Иванова, С.А., Романов, К.П. Влияние добавок золы на структуру и прочность цемента // Строительная химия. 2019. №3. С. 18–24.
11. Brown, P., Smith, R. Hydraulic properties of composite cements with mineral additions // Advanced Cement Research. 2020, Vol. 32. PP. 55–67.
12. Кудряшов, И.Г., Мартынова, Д.А. Влияние минеральных наполнителей на цементы низкой водопотребности // Инновационные строительные технологии. 2021. №2. С.15–20.

Conclusions

The conducted research demonstrates that industrial waste from the Republic of Kazakhstan has significant potential for producing composite cements (LWDC) with enhanced physical and mechanical properties, thereby improving the resource-saving and environmental metrics of the construction industry.

Using granulated blast furnace slag as a filler proves more effective compared to fly ash, particularly for producing LWDC50 and LWDC30. Fly ash exhibits high efficiency when partially replacing clinker—up to 30%—due to its pozzolanic activity. The selection of components for composite binders depends on the design requirements for the cement system, including strength characteristics, curing times, and environmental considerations.

Acknowledgments

We express our gratitude to the accredited construction testing laboratory LLP "SV Lab" for providing equipment and conducting laboratory work during the analyses.

References:

1. Stahel, W.R. (1982). The Product-Life Factor. The Woodlands, Texas.
2. Pearce, D., Markandya, A., & Barbier, E. (1990). Sustainable Development: Economics and Environment in the Third World. London: Elgar, Earthscan Publications Ltd.
3. Graedel, T.E. (2011). Recycling, Material Efficiency, and the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 317–319.
4. Lifset, R., et al. (2013). The Circular Economy and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 17(3), 324–327.
5. Shaigazinova, A.E. (2013). Waste Management in Mining and Processing of Mineral Resources as an Important Environmental Measure. Materials of the Republican Scientific and Theoretical Conference "Seyfullin Readings – 9: A New Vector of Development of Higher Education and Science," Part 1, Volume 2, pp. 147–149.
6. Trofimov, B.Y., & Shuldyakov, K.V. (2015). On the Use of Low-Activity Granulated Blast Furnace Slag. *Architecture, Urban Planning, and Design*, (6), pp. 37–45.
7. Vasilyev, O.P. (2015). Low-Water-Demand Cements: Compositions and Technology. *Construction Sciences Bulletin*, (4), pp. 12–20.
8. Zakharov, K.I., & Sokolov, A.V. (2022). Optimization of Low-Water-Demand Cement Compositions. *Scientific Proceedings of the Construction Institute*, (8), pp. 44–50.
9. Morozov, Y.V., & Lavrov, A.G. (2022). Analysis of Low-Water-Demand Cement Properties. *Construction Industry Materials*, (3), pp. 48–54.
10. Ivanova, S.A., & Romanov, K.P. (2019). The Effect of Fly Ash Additives on Cement Structure and Strength. *Construction Chemistry*, (3), pp. 18–24.
11. Brown, P., & Smith, R. (2020). Hydraulic Properties of Composite Cements with Mineral Additions. *Advanced Cement Research*, 32, pp. 55–67.
12. Kudryashov, I.G., & Martynova, D.A. (2021). The Influence of Mineral Fillers on Low-Water-Demand Cements. *Innovative Construction Technologies*, (2), pp. 15–20.

13. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сарсенбаев Б.К., Сарсенбаев Н.Б., Карымсахов С. Д. Об эффективности применения промышленных отходов Республики Казахстан для производства цемента низкой водопотребности // *Строительные материалы*. 2013. №5. С. 82-84.
14. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. Карбонатные цементы низкой водопотребности. – М.: Монография. Издательство АСВ, 2021. – 366 с.
15. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
16. Бабаев Ш.Т., Башлыков Н.Ф., Сердюк В.Н. Высокоэффективные вяжущие низкой водопотребности и бетоны на их основе. М.: Стройиздат, 1991.
17. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Битуев А.В., Урханова Л.А. Эффективность применения золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС в составе цемента низкой водопотребности // *Строительные материалы*. 2011. №7. С. 76-78.
18. Астрейко А. Н. Получение портландцемента с использованием синтетического гипса из серной кислоты и некондиционного клинкера / А. Н. Астрейко, Е. А. Бут-Гусаим // 73-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: тезисы докладов. - Минск: БГТУ, 2022. – С. 212.
19. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Портландцементный клинкер. М.: Стройиздат, 1967.
20. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XMA YRX.
21. Смирнов, А.Б., Филиппов, Н.П. Исследование свойств цемента с использованием некондиционного клинкера. Вестник строительных технологий, 2022, №2, с. 56–62.
13. Khozin, V.G., Khokhryakov, O.V., Sarsenbayev, B.K., et al. (2013). Efficiency of Industrial Waste from the Republic of Kazakhstan for Producing Low-Water-Demand Cements. *Construction Materials*, (5), pp. 82–84.
14. Khozin, V.G., Khokhryakov, O.V., & Sibgatullin, I.R. (2021). Low-Water-Demand Carbonate Cements. Monograph. Moscow: ASV Publishing House, 366 pages.
15. Batrakov, V.G. (1998). Modified Concretes: Theory and Practice. 2nd Ed., Revised and Expanded. Moscow, 768 pages.
16. Babaev, Sh.T., Bashlykov, N.F., & Serdyuk, V.N. (1991). Highly Efficient Low-Water-Demand Binders and Concretes Based on Them. Moscow: Stroyizdat.
17. Khozin, V.G., Khokhryakov, O.V., Bituev, A.V., & Urkhanova, L.A. (2011). Efficiency of Gusinozerskaya CHP Fly Ash in Low-Water-Demand Cements. *Construction Materials*, (7), pp. 76–78.
18. Astreiko, A.N., & But-Gusaim, E.A. (2022). Production of Portland Cement Using Synthetic Gypsum from Sulfuric Acid and Unconditioned Clinker. Materials from the 73rd Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students, Minsk: BSTU, pp. 212.
19. Butt, Y.M., & Timashev, V.V. (1967). Portland Cement Clinker. Moscow: Stroyizdat.
20. Gusev, B. V. Technology of Portland cement and its varieties: Textbook / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, IP R Media, 2016. - 113 p. - ISBN 978-5-7264-1230-6. - EDN XMA YRX.
21. Smirnov, A.B., & Filippov, N.P. (2022). Investigation of Cement Properties Using Unconditioned Clinker. *Construction Technology Bulletin*, (2), pp. 56–62.

Храмцов Александр Борисович – аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

Урханова Лариса Алексеевна – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, *E-mail:* urkhanova@mail.ru

Вайнбергер Сергей Адамович – магистр технических наук, ТОО «SV Lab», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Вайнбергер Алёна Олеговна – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева

Вклад авторов написание статьи равнозначный.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Khramtsov Alexander Borisovich – Graduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, *E-mail:*

Urkhanova Larisa Alekseevna – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, *E-mail:* urkhanova@mail.ru

Weinberger Sergey Adamovich – Master of Technical Sciences, LLP "SV Lab", Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Weinberger Alena Olegovna – Master of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

The authors contribution to the writing of the article is equal.

The authors declare that there is no conflict of interest.