

UDC 691.32
IRSTI 67.09.33
REVIEW ARTICLE

ANALYSIS OF PROSPECTS FOR THE USE OF LOCAL RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF SELF-SEALING CONCRETES IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

I.V. Kolesnikova¹ , A.S. Suvorov² , N.Y. Bekturganova^{1,*} 

¹International Educational Corporation, 050028, Almaty, Kazakhstan

²Central Laboratory of Certification tests of Building Materials, 050058, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *Initiation of production and application of self-compacting concrete (SCC) in Kazakhstan requires not only local research within the framework of solving technological problems in one agglomeration under active construction, but also an assessment of potential opportunities for the development of the raw material base of SBC and processing industries in different regions. Taking into account that the raw material possibilities for these purposes in the regions of Kazakhstan differ to a great extent, and the considered type of concrete is economically feasible only when using local raw materials in the composition, the conceptual approaches to the selection and evaluation of raw materials for SCC, known in the world scientific practice, were analyzed and summarized. as well as the results of the development of SCC in KazGASA with the use of raw materials relevant for a number of regions. Studies of local raw materials have shown the prospect of using high-silica furnaces in high-strength substations; fillers from the screenings of stone crushing of local rocks, represented by hydrothermally and metasomatically altered porphyrites of medium-major composition and porphyries of decrystallized quartz-feldspar composition; granites and hybrid rock of quartz diorite in composition with zeolite, microsilica. Issues requiring study were identified in the application of certain types of raw materials, which differ in mineralogical and other characteristics from those previously studied, issues in the development of own technology for the synthesis of organic modifiers for SCC.*

Keywords: *high-functional concrete, local mineral resource base, efficiency, composition, cement, superplasticizers, modification.*

***Corresponding author**

Neila Bekturganova, e-mail: bektur_n@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-08>

Received 27 October 2023; Revised 09 November 2023; Accepted 27 November 2023

ӘОЖ 691.32
ҒТАМР 67.09.33
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ӨЗДІГІНЕН ТЫҒЫЗДАЛАТЫН БЕТОНДАР АЛУ ҮШІН ЖЕРГІЛІКТІ ШИКІЗАТТЫ ПАЙДАЛАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫН ТАЛДАУ

И.В. Колесникова¹ , А.С. Суворов² , Н.Е. Бектурганова^{1,*} 

¹ Халықаралық білім беру корпорациясы, 050028, Алматы, Қазақстан

² Құрылыс материалдарын сертификаттау сынақтарының орталық зертханасы, 050058, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Қазақстанда өздігінен нығыздалатын бетонды (ӨТБ) өндіру мен пайдалануды бастау белсенді салынып жатқан бір агломерациядағы технологиялық мәселелерді шешудің бөлігі ретінде жергілікті зерттеулерді ғана емес, сонымен қатар шикізат базасын пайдаланудың әлеуетті мүмкіндіктерін жалпы бағалауды талап етеді. және ӨТБ дамыту үшін әртүрлі аймақтардың өңдеу өнеркәсібі. Қазақстан аймақтарында осы мақсаттарға арналған шикізат мүмкіндіктері айтарлықтай өзгеретінін және қарастырылып отырған бетон түрі тек жергілікті шикізатты құрамның бір бөлігі ретінде пайдаланған кезде ғана экономикалық тұрғыдан тиімді екендігін ескере отырып, іріктеудің әлемдік ғылыми тәжірибесінде белгілі тұжырымдамалық тәсілдер және ӨТБ шикізатын бағалау талданған және жалпыланған, сонымен қатар бірқатар өңірлер үшін өзекті шикізатты пайдалана отырып, ҚазБСҚА-да ӨТБ әзірлеу нәтижелері берілген. Жергілікті шикізатты зерттеу беріктігі жоғары ӨТБ -да кремнеземді опокаларды қолданудың уәдесін көрсетті; орта негізді құрамды гидротермиялық-метасоматикалық өзгерген порфириттермен және кристалданған кварц-далалық құрамды порфириттермен ұсынылған жергілікті тау жыныстарының тастарды ұсақтау скринингтерінен толтырғыштар; граниттер мен кварц диоритінің цеолитпен, микрокремний тотығы бар гибриді жынысы. Бұрын зерттелгендерден минералогиялық және басқа да сипаттамалары бойынша ерекшеленетін шикізаттың әсекелеген түрлерін пайдалануға қатысты зерттеуді қажет ететін мәселелер, ӨТБ үшін органикалық модификаторларды синтездеудің өзіндік технологиясын жасау мәселелері анықталды.

Түйін сөздер: жоғары функционалды бетон, жергілікті минералды-шикізат базасы, тиімділігі, цемент, суперпластификаторлар, модификация.

*Автор-корреспондент

Нәйла Бектурганова, e-mail: bektur_n@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-08>

Келіп түсті 27 қазан 2023; Қайта қаралды 09 қараша 2023; Қабылданды 27 қараша 2023

УДК 691.32
МРНТИ 67.09.33
ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

И.В. Колесникова¹ , А.С. Суворов² , Н.Е. Бектурганова^{1,*} 

¹Международная образовательная корпорация, 050028, Алматы, Казахстан

²Центральная Лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, 050058, Алматы, Казахстан

Аннотация. *Инициирование производства и применения самоуплотняющихся бетонов (СУБ) в Казахстане требует не только локальных изысканий в рамках решения технологических задач в одной активно строящейся агломерации, но и оценки в целом потенциальных возможностей использования для разработки СУБ сырьевой базы и перерабатывающих производств различных регионов. Учитывая, что сырьевые возможности для этих целей регионов Казахстана в значительной степени разнятся, а рассматриваемый вид бетона экономически целесообразен только при использовании в составе композиции местных сырьевых материалов, были проанализированы и обобщены известные в мировой научной практике концептуальные подходы выбора и оценки сырьевых материалов для СУБ, а также приведены результаты разработок СУБ в КазГАСА с применением актуального для ряда регионов сырья. Исследования местного сырья показали перспективность применения высококремнеземистых опок в высокопрочных СУБ; наполнителей из отсевов камнедробления местных пород, представленных гидротермально-метасоматически измененными порфиритами средне-основного состава и порфирами раскристаллизованного кварц-полевошпатового состава; гранитами и гибридной породы кварцевого диорита в композиции с цеолитом, микрокремнеземом. Были выявлены требующие изучения вопросы по применению отдельных видов сырья, отличающихся по минералогическим и другим признакам от ранее изученных, вопросы разработки собственной технологии синтеза органических модификаторов для СУБ.*

Ключевые слова: *высокофункциональный бетон, минерально-сырьевая база, эффективность, композиция, цемент, суперпластификаторы, модификация.*

*Автор-корреспондент

Нэйла Бектурганова, e-mail: bektur_n@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-08>

Поступила 27 октября 2023; Пересмотрена 09 ноября 2023; Принята 27 ноября 2023

1 ВВЕДЕНИЕ

Высокофункциональные бетоны (ВФБ) широко применяются в строительстве за рубежом (Cazacu N., 2016). В Республике Казахстан, несмотря на значительный интерес местных производителей товарного бетона, бетонных конструкций и строительных компаний, в настоящее время опыта использования таких бетонов практически нет. Основной объем производства изделий и конструкций из ВФБ в мировой практике приходится на самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). СУБ обеспечивают получение изделий с высокими качественными характеристиками, в том числе и с нетипичными для обычного бетона свойствами. Такие бетоны эффективны для изготовления густоармированных конструкций, для тонкослойных конструкций, для криволинейных несущих и ограждающих элементов, для обеспечения конструкциям высоких показателей несущей способности, в конструкциях специального назначения, а также позволяют процессы изготовления конструкций, в том числе общестроительного назначения, сделать менее трудоемкими и менее энергоемкими. Самоуплотняющиеся бетоны могут изготавливаться с разными заданными характеристиками: по плотности легкими и тяжелыми; как со средними характеристиками прочности, так и высокопрочными; с улучшенными деформационными характеристиками без микроармирования и с его использованием; иметь высокие показатели коррозионной стойкости и другие улучшенные эксплуатационные свойства; характеризоваться специальными свойствами (самоочищающиеся, декоративные и другие) (Person B., 2001; Subhan Ahmad et al., 2017; Abdullah Alshahrani a,b, Sivakumar Kulasegaram, 2023; Çelik, Z., & Bingöl., 2020). Таким образом, СУБ весьма актуален в контексте возможностей как для повышения качества строительства, практической реализации новых архитектурных решений, внедрения в производство нового высокоэффективного оборудования со значительным расширением функциональных возможностей и производительности, так и для заявленной концепции по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике».

Сдерживающими факторами внедрения и использования технологий СУБ до настоящего времени в Казахстане являлось отсутствие финансовой поддержки исследований в этой области, отсутствие государственных стандартов на этот вид бетона (регламентируются только методы определения свойств), продолжающая быть слабой связь науки и производства.

В последнее время отношение к проблеме изменилось, но опыт исследований в Казахстане в области получения самоуплотняющихся бетонов на основе местного сырья все же пока незначителен. Заслуживают внимания разработки Казахской головной архитектурно-строительной академии (КазГАСА) Международная образовательная корпорация (МОК) и НИИСтромпроекта, ведутся разработки учеными Satbayev University. Однако при разработке СУБ на основе местных сырьевых материалов не рассматривалась возможность получить для применения в их составах отечественных органических, органоминеральных модификаторов, являющихся на сегодняшний день в Казахстане исключительно импортируемым продуктом. Такая задача впервые поставлена в исследованиях, выполняемых в МОК в рамках проекта с грантовым финансированием МНВО РК «Разработка многофункциональных нано и микромодификаторов для технологии высокофункциональных бетонов».

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Характерной особенностью состава высокофункциональных бетонов (ВФБ) и, в частности, самоуплотняющихся бетонов, является многокомпонентность, которая требует системного подхода к выбору сырьевых материалов с учетом их влияния на функциональность применяемых модификаторов, а также взаимовлияния в составе композиции при формировании свойств бетонной смеси и бетона различного назначения. Концепция ВФБ предполагает получение композиций, отличающихся часто повышенной вязущеемкостью, примене-

нием не только заполнителей, но и композиций тонкодисперсных минеральных материалов (влияющих на реологические характеристики бетонной смеси, обеспечивающих вместе с другими составляющими самоуплотнение композиции при структурообразовании), а также дорогостоящих органических, органо-минеральных модификаторов.

Многокомпонентность ВФБ и современные подходы к оценке эколого-экономической эффективности производства бетонов обусловили получение этого вида бетона с использованием возможностей исключительно местной сырьевой базы.

Учитывая территорию Казахстана, локацию месторождений различных горных пород и минералов для получения природного сырья и производств, отходы которых применяют в технологии бетонов, а также особенности химического, минералогического состава сырьевых материалов, эффективные составы ВФБ также будут предполагать отличия. При этом, состав ВФБ, безусловно, будет определяться и заданным функциональным назначением. Соответственно, эффективные составы ВФБ в различных регионах Казахстана будут значительно различаться.

В связи с этим, представляет интерес оценка перспектив инициирования и развития технологии наиболее актуального и востребованного вида ВФБ - СУБ в Республике Казахстан с точки зрения анализа сырьевого потенциала и оценки влияния сырьевых материалов на функциональные характеристики модификаторов.

В мире проведены многочисленные исследования по влиянию различных составляющих на формирование свойств СУБ. Некоторые виды сырьевых материалов в композициях СУБ достаточно хорошо исследованы и включены в составы практически во всех странах, практикующих применение СУБ. Однако необходимо учитывать, что по химическому, минералогическому составу один и тот же вид сырья может несколько отличаться в разных странах, а одна из особенностей СУБ – ярко выраженная «чувствительность» к такой вариативности.

Некоторые местные природные материалы Казахстана в прогнозе имеют хорошую перспективу использования в СУБ, но малоизучены в силу, возможно, отсутствия в достаточных объемах аналогичных материалов в странах, являющихся лидерами в области исследования и применения СУБ.

Для получения СУБ в мировой практике, как правило, используются высокомарочные цементы. Однако, это приводит к повышению себестоимости бетона, учитывая, фактор повышенной вяжущеемкости композиций СУБ. Принимая во внимание, что основные объемы используемого в Казахстане бетона для конструкций общестроительного назначения характеризуются марками В20-В30, представляет интерес получения СУБ в этом диапазоне прочности. Не исключается целесообразность разработки составов высокопрочных бетонов для уникальных объектов и объектов специального назначения. Удовлетворяющим эти цели является применение цемента ЦЕМ I 42,5 (ГОСТ 31108-2020). Также важное значение имеет минералогический состав цементов, влияющий на функциональную эффективность суперпластификаторов и сроки твердения бетонов, требования к которым отличны для изготовления сборных конструкций и монолитных технологий. Ранее проведенные в КазГАСА эксперименты показали возможность получения бетонов класса В30 - В55 с использованием бездобавочных цементов ЦЕМ I 32,5 казахстанского производства за счет оптимизации вида и количества применяемых местных инертных и активных минеральных тонкодисперсных продуктов в композиции, а также технологии подготовки и введения в композицию материалов. В качестве модификаторов применялись поликарбоксилатные суперпластификаторы и ускорители на основе негидратированных силикатов кальция, хорошо совместимые и эффективные в составах на быстротвердеющих цементах.

Важным положительным фактором инициирования внедрения СУБ в практику строительства является отсутствие в Казахстане дефицита цемента «линейки» актуальных для СУБ марок. Всего цементная промышленность по данным Комитета по статистике 2021 г. производит около 13 млн. тонн в год (производственная мощность составляет 17 млн тонн) и

представлена предприятиями практически во всех регионах Казахстана: ТОО «Каспийцемент», АО «Шымкентцемент», ТОО «Шарцемент», ТОО Жамбылская цементная производственная компания» ТОО «Кокше цемент», «Рудненский цементный завод», ТОО «Стандартцемент», ТОО «Бухтарминская цементная компания», ТОО «Производственная компания цементный завод Семей», ТОО «Састобе технолоджис», ТОО «Алацем» (введен в 2020 г., ст. Сары-Озек Алматинской области). Анализ номенклатуры предприятий цементной промышленности показал возможность удовлетворения спроса для производства СУБ на представляющие интерес цемента марок по ГОСТ 31108-2020 ЦЕМ I 32,5Б, ЦЕМ I 42,5Б, ЦЕМ I 32,5Н, ЦЕМ I 42,5Б по ГОСТ 22266-2013 ЦЕМ I 32,5Н СС, ЦЕМ I 42,5Н СС, по ГОСТ 10178-85 ПЦ 400-Д0, ПЦ 500-Д0. Предполагается также изучить возможность и целесообразность получения СУБ на цементах с добавками, учитывая сложность подбора многокомпонентных композиций СУБ.

Требуется опробование и определение сравнительной эффективности в СУБ цементов разных компаний, принимая во внимание влияние особенностей минералогического состава и гранулометрии на проявление функциональных свойств применяемых в бетонах модификаторов, в том числе отечественных, разрабатываемых в КазГАСА. Известно, что адсорбционная способность суперпластифицирующих добавок (СП) гидрофилизующего действия меняется по схеме: $C_3A > C_4AF > C_3S > C_2S$, что делает их наиболее эффективными в «жирных» бетонных смесях на высокоалюминатном цементе, а при при водоцементном отношении менее 0,4 эффективность пластифицирующего действия СП резко падает и консистенция пластифицированного раствора в значительной мере определяется количественным содержанием в цементе зерен фракции 20—40 мкм. При этом надо отметить, что результаты известных исследований по влиянию суперпластификаторов на процессы гидратации C_3A и гипса отчасти противоречивы, т.к. влияние оказывают также дозировки, водотвердое отношение, соотношения, $C_3A:CaSO_4 \cdot 2H_2O$, температура смеси при твердении, молекулярная масса СП (Ушеров-Маршак А.В., 2020). Кроме того, соотношения компонентов в исследуемых смесях и их свойства различны, неодинаковы и методы исследования, что затрудняет сравнение данных. Минералогический состав цемента может изменять значения прямого или опосредованного влияния СП на скорость структурообразования и морфологию, размеры кристаллических продуктов гидратации цемента. Так, в целом суперпластификаторы замедляют превращение этрингита в моносulфоалюминат кальция вследствие адсорбции добавки на продуктах гидратации C_3A . Введение СП в разных дозах приводит к замедлению процессов гидратации C_3S , причем с ростом концентрации добавки усиливается и ее тормозящее гидратацию действие, изменяется и соотношение между CaO и SiO_2 в C-S-H. Замедляющее действие СП будет зависеть не только от минералогического состава цемента, но и от химического состава добавки, наличия в ней некоторых катионов. Морфология кристаллогидратных образований, химический состав образований, как следствие, свойства цементного камня будут также зависеть от особенностей условия твердения цементов различного минерального состава в присутствии СП, условий введения СП.

СУБ получают как с использованием только мелкого заполнителя (песков) (порошковый, песчаный), так и с использованием крупного заполнителя (фракции 5-10 мм, 5-14 мм (в соответствии с зарубежными стандартами). Казахстан значительные запасы обломочных (песков, песчано-гравийных смесей с большим содержанием песка) и скальных пород для производства заполнителей бетона. Но размещение их неравномерно. Например, ограничено обеспечены запасами полиминерального строительного песка Восточно-Казахстанская, Северо-Казахстанская, Жамбылская, Акмолинская, Алматинская, Туркестанская области (Ни В.В., 2018). В интенсивно развивающейся Западно-Казахстанской, например, области щебень ввозится в основном из Актюбинской области, при этом есть значительные ресурсы для получения зернистых материалов для бетона из известняков, искусственных заполнителей из местных опок. Месторождения кварцевого песка малочисленны, их применение должно быть обосновано экономически, т.к. они являются ценным сырьем для производства стекла, керамики. Такие

особенности региональной сырьевой базы предполагают разработку СУБ с использованием различных по минеральной природе местных недефицитных песков и щебня.

Требуемые реологические свойства СУБ (высокая заполняющая способность, способность преодолевать препятствия и устойчивость к расслоению) достигаются плотной упаковкой цементной матрицы путем обеспечения непрерывной гранулометрии состава и эффективным соотношением составляющих минеральных компонентов и добавок в бетон. Наряду с вяжущим обязательным является введение тонкодисперсных минеральных продуктов (наполнителей, минеральных добавок). В сильно пластифицированных бетонных смесях СУБ для крупного заполнителя, как макроструктурного элемента, реологическая матрица – это сложная дисперсия, состоящая из песка, цемента, пуццолановой (часто в композиции с инертной) добавки и воды. Однако, роль тонкодисперсных фракций минерального сырья в формировании свойств СУБ неоднозначна. При выборе наполнителей из горных пород и техногенных продуктов оценивается их реологическая, пуццолановая активность, совместимость с другими составляющими композиции, влияние на изменение рН среды в бетоне, влияющей на коррозионную стойкость бетона и армирующих изделий. Оптимальным является введение того материала, который в сочетании с тем или иным суперпластификатором в водно-минеральной суспензии обеспечит наименьшее сопротивление при гравитационном растекании бетонных смесей с минимальным количеством воды и обеспечит требуемую прочность и долговечность композиту.

Эффективность применения тонкодисперсных минеральных компонентов определяется также возможностью замены части цемента в отличающейся высокой вяжущемкостью СУБ, снижающей устойчивость (suitability) бетонных смесей (Urban M., 2018) и экономическую эффективность в сравнении с обычным бетоном. В связи с этим СУБ с пониженным содержанием вяжущего (SCC with low-cement) является одной из актуальных задач дальнейших исследований. Использование минеральных наполнителей взамен части цемента при достижении требуемых характеристик кроме экономической целесообразности важно и в контексте решения проблем экологии: уменьшается потребление энергии, выброс парниковых газов (CO₂) в атмосферу (Дерепко С. Н. & Никифорова И. А., 2015)

В качестве наполнителей, минеральных добавок в известной практике получения СУБ наиболее широко используются достаточно хорошо изученные зола-унос (Leung H.Y. et al., 2016; Nuruddin M.F. et al., 2014), микрокремнезем (Shobana K.S. et al., 2013; Kubens S. et al., 2018), тонкоизмельченный доменный шлак (Wang H.Y. & Lin C.C., 2013) и известняк (Kalashnikov et al., 2014), есть сведения по применению тонкоизмельченной пуццоланы из пород вулканического происхождения. При этом ряд пуццолановых и инертных наполнителей (минеральных добавок) исследованы мало, в частности: вулканическая пемза, перлит, опока, цеолиты, каменная мука из переработки отсевов плотных магматических горных пород.

Применение золы-уноса в некоторых регионах Казахстана в ближайшей перспективе потеряет актуальность ввиду перехода ТЭЦ от твердого топлива на газ, однако неиспользованными остаются большие объемы отвалов этого техногенного сырья. Известен опыт применения в составе СУБ в комплексе с микрокремнеземом СУБ золы сжигания рисовой шелухи. Введение их в состав СУБ обеспечивает повышение предела прочности на сжатие до 70%, повышение модуля упругости бетона до 15%, значение меры ползучести бетона от 0,44 до 1,19 меры ползучести равнопрочного бетона без модификатора, снижение контрактционной усадки до 30%, что положительно влияет на раннюю трещиностойкость железобетона, практически не влияет на усадку при высыхании (Та Ван Фан, 2013). Этот опыт может быть использован в Кызылординской области, где производится переработка отходов рисового производства.

Представляется интересным рассмотреть возможность использования молотых шлаков доменного производства, имеющихся в значительных объемах в Казахстане, но перспективы применения этого вида техногенных отходов проблематичны, учитывая нестабильность их составов в отвалах даже одного предприятия.

Широко применяемый в мире в технологиях СУБ микрокремнезем (микросилика) в Казахстане получают на АО «Тау-Кен Самрук», г. Караганда.

Во многих развивающихся странах ввиду роста производства бетона наблюдается возрастающая тенденция спроса природных пуццолановых наполнителей, поскольку не везде имеется доступ к пуццолановым отходам промышленности. Свойства природного сырья различных месторождений для получения пуццолановых наполнителей могут значительно отличаться. Как правило, в качестве используемых в композиции СУБ природных пуццоланов имеют вулканическое происхождение, возможно, в основном из-за широкого распространения этих пород во многих странах. Так, пирокластические материалы, образующиеся в результате взрывного извержения, такие как вулканический пепел, пемза и перлит, проявляют высокую пуццолановую активность благодаря более высокому содержанию аморфного кремнезема и высокопористой, везикулярной природе. После осаждения пирокластического материала при определенных условиях окружающей среды происходит генетическое превращение аморфного материала в кристаллические цеолиты. Получающиеся в результате цеолитсодержащие породы часто представляют собой когерентные туфы и при измельчении до достаточной тонкости обладают высокой пуццолановой активностью. Таким образом, группа природных вулканических наполнителей может быть подразделена на подгруппы ([Juenger M. et al., 2012](#)): неизменные пирокластические, такие как вулканическая пемза и пепел; измененные пирокластические – цеолитизированные туфы. Известно применение цеолитизированных туфов (цеолитов) в качестве сырья в цементной промышленности Китая, Германии, Италии, России, Турции, США, Ирана, Испании и других стран. Однако, исследований по применению цеолитов как минеральной добавки в СУБ, практически нет. Так, известен опыт изучения влияния пемзы и цеолита на свойства СУБ в агрессивных средах. Замещение вяжущего составило 10 и 15 от массы цемента. Отмечается, что составы, содержащие пемзу, демонстрируют прочность на сжатие, практически равную прочности контрольного образца в раннем возрасте и выше, чем в долгосрочном периоде. Тогда как составы с цеолитом показывают лучшие сопротивление расслоению из-за большей пористой морфологии. При испытании стойкости в агрессивных средах, составы с цеолитом показали лучшие результаты, в сравнении с пемзой. В работе ([Najimi M. et al., 2012](#)) изучался характер влияния пуццолановых наполнителей на реологические свойства бетонной смеси, прочностные свойства затвердевшего бетона, также их микроструктура. Основываясь на минералогическом составе цеолита, а именно большого содержания клиптололита, авторы предположили его большую пуццолановую активность. Однако по результатам испытаний составы с цеолитом показали меньшую прочность, даже ухудшили ее в ранний период по сравнению с контрольным. Напротив, прочность на сжатие в СУБ, содержащем пемзу увеличилось как в раннем, так и в долгосрочном периоде с заметным увеличением в долгосрочной перспективе. В внутренней структуре СУБ с цеолитом было замечено больше капиллярных пор в сравнении с пемзой, опять так и объяснимое пористостью структуры наполнителей. При этом, сопротивление расслоению как в ранней, так и долгосрочной перспективе были лучше у цеолита, тогда как у пемзы загущающая способность проявлялось лишь по истечению времени. В других известных работах исследователи отмечают увеличение прочностных свойств и долговечности СУБ при применении цеолитосодержащих наполнителей. Было установлено, в частности, что введение природного цеолита в количестве 5 и 10% от массы цемента не приводит к повышению водопотребности смеси; увеличивает прочность при сжатии, соответственно, 37- 28%, прочность при изгибе – на 19%. Высокая загущающая способность цеолита была отмечена в ряде работ ([Milović T. et al., 2015](#)). Авторы сравнивали эффективность разного рода химических модификаторов вязкости и цеолита из-за высокой стоимости первых. Согласно Фенгу Найкяну, цеолиты достаточно активно применяются в бетонном производстве Китая. Определение поглощающей способности показало, что она очень высока и превышает 150 мг СаО/г, а в случае клиноптилолита из некоторых отложений даже 200 мг/г. При этом цеолиты поглощают в себя часть воды, вода является носителем пластификаторов,

растворенных и частично встречающихся в форме подвески, благодаря этому методу действие пластификатора продлевается и реологические свойства бетонной смеси сохраняются при транспортировке, размещении и даже откачке.

В целом, немногочисленные исследования по цеолитсодержащим породам и цеолитам имеют противоречивые результаты.

Исследования применения цеолита для местных СУБ Казахстана, актуальны, в частности, для производств в Алматической области, в Восточно-Казахстанской области, где расположены, соответственно, Чанканайское и Тайжузгенское месторождение цеолитов. В КазГАСА были проведены эксперименты по получению СУБ для производства сборных конструкций и монолитных технологий с введением в качестве минеральной функциональной добавки цеолита месторождения Чанканай. Результаты показали эффективность применения в составах без микрокремнезема цеолита до 15% от массы цемента в композиции с инертным наполнителем для получения бетона с пониженной вяжущемкостью (420 кг на куб.м), требуемой реологией и прочностью В30.

Особенно актуальным является получение порошкового, песчаного СУБ в Западно-Казахстанской области с ограниченными ресурсами скальных пород и, соответственно, производства щебня. Перспективными могут быть проведенные исследования по возможности применения в СУБ местных высококремнеземистых опок, с использованием которых (Шиповское месторождение) получены высокопрочные СУБ В55. Залежи возможной к использованию опоки есть в Актюбинской, Кызылординской области.

Представляется, может быть целесообразным применение шунгита, месторождение которого имеются только в Казахстане (Коксуское месторождение Алматинской области, месторождение «Бакырчик» Восточно-Казахстанской области) и Российской Федерации. Применение шунгита в качестве углеродсодержащего наномодификатора в бетонах изучалось в ряде работ, но разработок СУБ с его использованием нет. Это объясняется отсутствием ресурсов этого минерала в странах дальнего зарубежья, являющихся лидерами в разработке и применении СУБ. Учитывая, что рыночная стоимость выделенных фуллеренов высокого качества составляет в настоящее время 900-1000 долларов США за 1 грамм, применение природного сырья, имеющего такие структурные составляющие, может значительно снизить стоимость наномодификации бетона. В этой связи интерес ученых к шунгитовым породам проявляется и в дальнем зарубежье. Сегодня в недостаточной степени исследована и используются особенности органической матрицы шунгитовой породы в бетонах: биполярность, благодаря чему порода может легко смешиваться с веществами как органической, так и неорганической природы, проявляя высокие адгезионные свойства и обуславливая возможности создания наполненных бетонных композитов с различными связующими; электропроводность, экранирование электромагнитных излучений; возможность обеспечения композитам высокой механической прочности и малой истираемости; повышение коррозионной стойкости; экологическая чистота, бактерицидность. При этом некоторые ученые отмечают, что для обеспечения целесообразности применения шунгитового сырья в технологиях бетонов следует исключить использование сырья с содержанием углерода менее 10%. Таким образом, вопросы применения шунгитов в качестве наномодификаторов в составах СУБ весьма актуальны и перспективны ([Тюльнин В.А., 2015](#)).

В составах легких СУБ представляет интерес исследование эффективности применения алюмосиликатных микросфер энергетических зол (зол-уноса). Опыта применения в составах СУБ этого вида техногенного сырья практически нет. Алюмосиликатные микросферы как товарный продукт производятся в г. Экибастуз, г.Павлодар и др.

В отличие от пуццолановых наполнителей, отходы каменных работ имеют такую же удельную поверхность, как и цемент, такие как известняковая мука, горная пыль, хвосты шахт, отходы ракушек и другие инертные твердые отходы, по своей сути не являются цементирующими. Тем не менее, было обнаружено, что включение таких тонких наполнителей может определенным образом повысить удобоукладываемость бетонной смеси. Вопрос ис-

пользования отходов добычи и переработки каменных материалов, за исключением карбонатных пород, в качестве инертных наполнителей в литературе встречается крайне редко. Инертные наполнители выполняют роль «разбавителей» цемента - позволяют получить бетоны низких и средних классов по прочности при пониженных водоцементных отношениях (В/Ц), что обеспечивает высокую морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость таких бетонов. Применение инертных минеральных наполнителей, снижающих прочность бетона за счет эффекта разбавления, оправдано для бетонов, изготавливаемых с использованием в композиции высокоактивных наполнителей. Совместное использование с СП и другими композиционными составляющими может проявляться синергетический эффект, позволяющий повысить эффективность применения. Кроме того, эти добавки целесообразно применять для приготовления бетонных смесей с высокой подвижностью при пониженном расходе цемента.

Введение инертных наполнителей в зависимости от количества могут снижать В/Ц, что несколько уменьшает потерю прочности при замещении цемента, что объясняется увеличением объемной концентрации цементирующих продуктов гидратации вяжущего и уменьшением объема пор при снижении В/Ц. Кроме того, эффект разбавления цемента инертными частицами может снижаться за счет диффузионного переноса цементирующего вещества в зону контакта инертных частиц, который установлен в работе ([Kalashnikov I.V. & Kalashnikov S.V., 2004](#)) для вяжущих систем с низким В/Ц. Для уменьшения негативного влияния инертных минеральных добавок на прочность при снижении водоцементного отношения их использование в большей степени оправдано при совместном применении с суперводоредуцирующими химическими добавками. В связи с этим, основными критериями выбора материала для получения инертного наполнителя являются его влияние на водопотребность цементного теста с суперпластификатором, а также размолоспособность (за исключением применения пыли камнеобрабатывающих производств). Один из факторов, которые будут способствовать широкому использованию инертных минеральных наполнителей в технологии СУБ – большие объемы отсевов дробления щебня, камнеобрабатывающего производства, содержащие значительную долю пылевидных фракций, которые в настоящее время не находят применения и накапливаются в отвалах. В ряде работ зарубежных ученых исследовался вопрос замены части цемента микронаполнителем, полученным при камнеобработке горных пород – известняка, магматических горных пород и др.

В частности, отмечается, что физическое влияние на свойства смесей и бетона карбонатного наполнителя связано с малым размером частиц известняка, которые могут не только увеличить плотность упаковки наполнителя и уменьшить капиллярную пористость, увеличивая водонепроницаемость. Химические факторы подразумевают влияние ионов известнякового наполнителя в цементной системе, изменяя кинетику гидратации и морфологию продуктов гидратации. В работе ([Sadek D. et al., 2016](#)) установлено, что при использовании известняка в качестве минеральной добавки к цементу в результате гидратации образуются в основном высокопрочные низкоосновные (по отношению к СаО) соединения, которые при уменьшении количества цемента обеспечивают высокую прочность цементного камня. Химические характеристики известняка, которые влияют на его эффективность, связаны с примесями, включая глину, кварц, доломит и другие минералы. Содержание глины увеличивает потребность в воде известнякового наполнителя и, соответственно, снижает подвижность свежего раствора. Универсальность гидроксида кальция проявляется в повышении агрегативной устойчивости суспензий из «грязных» дисперсных известняков с примесями SiO₂, Al₂O₃ и Fe₂O₃. При этом, наибольшая агрегативная устойчивость обеспечивается в суспензиях особоочистых кристаллических известняков при использовании суперпластификаторов как на нафталинсульфонатной, так и на поликарбоксилатной основах.

Результаты исследований показали, что известняковая и мраморная мука, введенная в качестве наполнителя в СУБ, значительно снижает содержание цемента и в то же время увеличивает прочность, долговечность и стабильность составов бетона. Перед многими пред-

приятными по производству щебня из гранита и других магматических плотных горных пород стоит проблема поиска рынка отсевов дробления или продуктов их переработки. Так, количество гранитной муки, образующегося в камнеобрабатывающей промышленности составляет около 65% от общего объема производства. Эффективность использования тонкодисперсного наполнителя из отсевов камнедробления изучалось в ряде работ ([Паникин Д.А., 2015](#); [Касторных Л.И. et al., 2017](#)). При введении его 20-50% от массы цемента и, как установлено исследованиями, бетонная смесь обладает высокой водоудерживающей способностью, длительной сохраняемостью, достигаемой за счет оптимальной дозировки гиперпластификатора и водоудерживающей добавки.

Известны некоторые результаты изучения возможности замены части цемента гранитной мукой, ее влияния на стабильность бетонной смеси и долговечность бетона, однако, вопрос мало изучен. В частности, известно, что введение гранитной муки в качестве замены пасты может снижать содержание цемента до 25%, существенно улучшить сопротивление бетонной смеси расслоению, уменьшить предельную деформацию и снизить скорость усадки, при этом прочность увеличилось на 12%. В других работах оптимальное замещение цемента гранитной мукой указано в диапазоне до 5%, увеличение приводило к снижению прочности. В ряде работ показана возможность использования отходов горнодобывающего комплекса при совместном помоле клинкера с целью получения дисперсно-наполненных цементов и бетонов на их основе. Рассматривались отходы камнедробления глубинных и излившихся горных пород магматического происхождения – диабазов, базальтов, гранитов, габбро-диоритов, известняков, доломитов, которые подвергали совместному помолу с цементным клинкером до получения удельной поверхности $400 \text{ м}^2/\text{кг}$, что, согласно рентгенофазового анализа дисперсно-наполненного цементного камня обеспечивает их высокую реакционно-химическую активность. Оптимальная дозировка тонкоизмельченных горных пород составляла 30%, что позволяло получить высокопрочные бетоны с повышенными эксплуатационными свойствами.

В работах Калашникова В.И., автора концепции порошково-активированных бетонов (может рассматриваться как один из видов СУБ), отмечается, что чрезвычайно важно использовать молотые горные породы с заданным диапазоном размеров частиц, при котором суспензии с СП при малом содержании воды должны обладать гравитационной растекаемостью под действием собственного веса. Гравитационная растекаемость водно-минеральных суспензий зависит от минерального состава горных пород, дисперсности порошка и объемной концентрации твердой фазы. При исследовании растекаемости суспензий и бетонных смесей, установлено, что большинство порошков из плотных горных пород образуют агрегативно-неустойчивые суспензии (гели) ([Kalashnikov, 2018](#)). При удельной поверхности порошков с $S_{уд}=300-500 \text{ м}^2/\text{кг}$ суспензии растекаются под действием собственного веса при водотвердом отношении $V/T=0,38-0,60$, т.е. при объемной концентрации твердой фазы $CV_T=38-46 \%$ объемное содержание твердой фазы (Т) меньше, чем воды (В). Это происходит потому, что в агрегативно-неустойчивых суспензиях частицы связаны в агрегаты, в которых находится свободная вода, не участвующая в увеличении растекаемости суспензий из-за повышенного предела текучести ([Kalashnikov, 2016](#)). Суспензии цемента и горных пород при введении СП превращаются в агрегативно-устойчивые суспензии. Этот переход в агрегативно-устойчивое состояние (золи) происходит при значительно меньшем содержании воды, но с уменьшением предела текучести и с повышением вязкости в момент растекания и сопутствующего разрушения слабых структурных связей. Они приобретают полимерно-подобный характер течения с формированием тонких струй в отличие от агрегативно-неустойчивых, которые вытекают с каплеобразованием вследствие недостаточности сил гравитации для преодоления предела текучести и предельного разрушения структуры в потоке. Растекаемость цементных суспензий обеспечивается при объемной концентрации твердой фазы 46-49% ($V/C=0,38-0,50$) ([Kalashnikov et al., 2014](#)).

Анализ технической литературы по порошково-активированным бетонам показал, что многие проведенные исследования преследовали цель использования при проектировании составов бетонов в качестве тонкодисперсных минеральных добавок кварцевые пески, однако, надо учитывать низкое значение их размолотоспособности. Агрегативно-неустойчивые суспензии микрокварца, микрокварцита, микрокварцевого песчаника с суперпластификаторами превращаются в агрегативно-устойчивые при добавлении малых дозировок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или портландцемента.

В целом, природа агрегативной устойчивости суспензий, состоящих из частиц различной минералогической природы с различными зарядами поверхностей, мало изучена. В частности, что глубинные кварцсодержащие породы, включающие в своем составе свободный кварц, будут потенциально реакционно-активными в длительные сроки твердения, что требует изучения изменений физико-технических свойств во время твердения бетона.

Месторождения известняков есть в Западно-Казахстанской, Северо-Казахстанской, Кызылординской областях. Как отмечалось, особенно актуально рассматривать возможность использования известняков для получения наполнителей в западных регионах, где нет производства щебня. Магматические плотные горные породы имеются во многих областях. Предприятия по получению щебня из скальных пород занимаются переработкой местных месторождений, породы которых значительно разнятся по минералогическому составу, соответственно, наполнители из отсеков дробления требуют исследования на предмет их эффективности в СУБ. Так, например, перспективные результаты показали проведенные в КазГА-СА исследования по использованию в СУБ отсеков камнедробления карьера Балтабай-1 Алматинской области в составах СУБ. Преобладающими породами в нем являются эффузивные горные породы (88%) и изверженные интрузивные горные породы (12%): Эффузивные - представлены гидротермально-метасоматически измененными порфиритами среднего состава и порфирами раскристаллизованного кварц-полевошпатового состава; интрузивные – гранитами и гибридной породы кварцевого диорита. Наполнитель из отходов камнедробления использовался в составах СУБ в композиции с активными добавками – цеолитом, микрокремнеземом. Были получены композиции, обеспечивающие получение бетона В30 с реологическими свойствами и сроками твердения для изготовления как сборных конструкций, так и монолитных технологий. Потенциальная сырьевая база для получения композиций СУБ в Казахстане с целью разработки эффективных составов и сравнительной оценки ее величины представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сырьевые материалы для изготовления СУБ в Казахстане [материалы авторов]

Виды бетона/ Материалы для изготовления СУБ	Тяжелые			Легкие	
	Сверх- прочные	Высоко- прочные	Средней прочности	Высоко- прочные	Средней прочности
Вязущие вещества					
ЦЕМ I 32,5Б	+	+	+	+	+
ЦЕМ I 42,5Б	+	+	+	+	+
ЦЕМ II 32,5Н	-	-	+	-	+
ЦЕМ II 42,5Н	-	-	+	-	+
Наполнитель					
Природные активные минеральные:					
Диатомит	-	-	+	-	+
Трепел	-	-	+	-	+
Опока	-	+	+	+	+
Вулканический туф	-	-	+	-	+
Шунгит	+	+	+	+	+
Цеолит	-	-	+	-	+

Искусственные активные минеральные:					
Микрокремнезем	+	+	+	+	+
Зола-уноса	+	+	+	+	+
Доменный шлак	-	-	+	+	+
Алюмосиликатные микросферы	+	+	-	+	+
Инертные минеральные (Минеральные порошки, получаемые помолом из горных пород):					
Известняк	+	+	+	+	+
Доломит	-	-	+	-	+
Кварцевый песок	-	+	-	+	-
Отсевы дробления щебня из скальных пород	+	+	+	+	+
Заполнитель					
Мелкий (M_к= 1,6-2,5)					
Песок строительный	+	+	+	-	-
Песок кварцевый	+	+	-	+	-
Песок карбонатный	-	-	+	-	-
Песок легкий, искусственный (керамзитовый, термолитовый и др.)	-	-	-	+	+
Крупный заполнитель* (M_к=5-20, 5-10)					
Щебень из изверженных плотных горных пород	+	+	+	-	-
Микроармирующие материалы					
Стальная фибра	+	+	+	-	-
Стеклопластиковая, базальтовая, полимерная фибра	-	-	-	+	+
Функциональные добавки (импортируются)					
Суперпластификаторы Гидрофобизаторы** Ускорители твердения** Стабилизаторы** и другие					

* Не используется при получении песчаных СУБ, порошково-активированных бетонов.

** Вводятся при необходимости обеспечения дополнительных эффектов.

3 ВЫВОДЫ

Минерально-сырьевая база Казахстана для производства СУБ достаточно разнообразна, представлена как материалами, эффективность которых в композициях достаточно изучена исследователями и используется в мировой практике, так материалами, имеющими в прогнозе хорошие перспективы применения, но малоизученными или требующими изучения. Учитывая большую вариативность минерального состава одной и той же горной породы в разных месторождениях и техногенного сырья, а также неравномерную локацию на территории Казахстана, сырьевые материалы должны подбираться для получения СУБ в конкретном городе, регионе.

В рамках перспективных исследований, финансируемых МНВО РК «Разработка многофункциональных нано и микромодификаторов для технологии высокофункциональных бетонов» в КазГАСА будет проведен комплекс исследований сырьевых материалов для отдельных регионов на предмет эффективности их использования в композиции с органическим модификатором, который впервые в Казахстане принят к разработке для обеспечения импортозамещения. На основе проведенных исследований предполагается разработка эффективных составов высокофункциональных бетонов с использованием местного сырья.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН АР 19679906 «Разработка multifunctional нано и микромодификаторов для технологии высокофункциональных бетонов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cazacu, N., Bradu, A., & Florea, N.** (2016). Self Compacting Concrete in Building Industry. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 62(1), 85.
2. **Persson, B.** (2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and concrete Research*, 31(2), 193-198. <https://doi.org/10.1016/S0008-8846%2800%2900497-X>
3. **Ahmad, S., Umar, A., & Masood, A.** (2017). Properties of normal concrete, self-compacting concrete and glass fibre-reinforced self-compacting concrete: an experimental study. *Procedia engineering*, 173, 807-813. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.12.106>
4. **Alshahrani, A., & Kulasegaram, S.** (2023). Effect of fibre diameter and tensile strength on the mechanical, fracture, and fibre distribution properties of eco-friendly high-strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 403, 133161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133161>
5. **Çelik, Z., & Bingöl, A. F.** (2020). Fracture properties and impact resistance of self-compacting fiber reinforced concrete (SCFRC). *Materials and Structures*, 53, 1-16. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01487-8>
6. **Usharov-Marshak, A. V.** (2020) Additives in concrete: progress and problems [Dobavki v beton: progress i problemy]. *Building materials*, 10, 8-12. (in Russ.).
7. **Ni, V. V.** (2009). Mineral resource base of the construction and road industry of the Republic of Kazakhstan [Mineral'no-syr'evaya baza stroitel'noj i dorozhnoj industrii Respubliki Kazahstan]. *Almaty: Izdatel'stvo «Mektep».* (in Russ.).
8. **Urban, M.** (2018). Low cement content SCC (Eco-SCC)–the alternative for ready-mix traditional concrete. In *MATEC web of conferences* (Vol. 163, p. 01004). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301004>
9. **Derepko, S. N., & Nikiforova, I. A.** (2015) Model of integral assessment of the efficiency of the introduction of ash and slag waste of the coal industry [Model' integral'noj ochenki effektivnosti vnedreniya zoloshlakovyh othodov ugol'noj promyshlennosti]. *Baikal Research Journal*, 6, 7-17. (in Russ.).
10. **Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., & Anwar, M. P.** (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 113, 369-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071>
11. **Nuruddin, M. F., Azmee, N. M., & Yung, C. K.** (2014). Effect of fire flame exposure on ductile self-compacting concrete (DSCC) blended with MIRHA and fly ash. *Construction and Building Materials*, 50, 388-393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.038>
12. **Shobana, K. S., Gobinath, R., Ramachandran, V., Sundarapandi, B., Karuthapandi, P., Jeeva, S., Dhinesh, A., Manoj Kumar, R., & Subramanian, M.** (2013). Preliminary study of Self Compacting Concrete by adding Silica Fume-A review paper. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(11), 1293-1304.

13. **Kubens, S., Peng, H., Oesterheld, S., Wallevik, O. H., & Iceland, I. C.** (2008). Some effects of silica fume on variations in rheology of mortar due to production date of cement. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 16, 4.
14. **Wang, H. Y., & Lin, C. C.** (2013). A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC). *Construction and Building Materials*, 42, 132-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.020>
15. **Kalashnikov, V. I., Moskvina, R. N., Belyakova, E. A., Belyakova, V. S., & Petukhov, A. V.** (2014). Highly dispersed fillers for powder-activated concrete of the new generation [Vysokodispersnyye napolniteli dlya poroshkovo-aktivirovannyh betonov novogo pokoleniya]. *Systems. Methods. Technologies*, 2(22), 113-118. (in Russ.).
16. **Fan, T. V.** (2013). Self-compacting high-strength concrete with rice husk ash and metacaolin [Samouplotnyayushchiesya vysokoprochnye betony s zoloy risovoj sheluhi i metakaolinom] [Unpublished candidate dissertation]. Rostov State University of Civil Engineering. (in Russ.)
17. **Juenger, M., Provis, J. L., Elsen, J., Matthes, W., Hooton, R. D., Duchesne, J., Courard, L., He, H., Michel, F., Snelling, R., & De Belie, N.** (2012). Supplementary cementitious materials for concrete: characterization needs. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1488, imrc12-1488. <https://doi.org/10.1557/opl.2012.1536>
18. **Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., & Shekarchi, M.** (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and building materials*, 35, 1023-1033. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038>
19. **Milović, T., Šešlija, M., Šupić, S., & VUKOSLAVČEVIĆ, S.** (2015, April). Influence of natural zeolite on some properties of mortar/concrete. In *International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering 2015 (Vol. 24, pp. 61-66)*.
20. **Tyulnin, V. A.** (2015). Shungite as a filler of composite materials with a unique complex of properties [SHungit kak napolnitel' kompozicionnyh materialov s unikal'nym kompleksom svoystv]. *Dry building mixes*, (2), 22-25. (in Russ.)
21. **Kalashnikov, V. I., & Kalashnikov, S. V.** (2004). Theory of hardening of composite cement binders. *Materials of the international scientific and technical conference "Actual issues of construction"* [K teorii tverdeniya kompozicionnyh cementnyh vyazhushchih, Materials of the International Scientific and Technical Conference "Topical issues of construction"]. Saransk: Izd. Mordovskogo Gos. University, 3, 119-123. (in Russ.)
22. **Sadek, D. M., El-Attar, M. M., & Ali, H. A.** (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>
23. **Panikin, D.A.** (2015). Development of self-compacting concretes with the use of stone crushing waste [Razrabotka samouplotnyayushchihsya betonov s primeneniem othodov kamnedrobleniya]. *Bulletin of the Donbass National Academy of construction and architecture*. 3(113), 38-42. (in Russ.)
24. **Kastornykh, L.I., Taroyan, A.G., & Usepian, L.M.** (2017). Influence of stone crushing and mineral filler on the characteristics of fine-grained self-compacting concrete [Vliyanie otseva kamnedrobleniya i mineral'nogo napolnitelya na harakteristiki melkozernistykh samouplotnyayushchihsya betonov]. *Engineering Bulletin of the Don*, 3(46), 107. (in Russ.).
25. **Kalashnikov, V.I.** (2018). On the terminology of self-sealing powder-activated concretes and new generation concrete mixtures [K terminologii samouplotnyayushchihsya poroshkovo-aktivirovannyh betonov i betonnyh smesey novogo pokoleniya] *Materials of the international conference. "Composite building materials. Theory and Practice"*: Penza, Russian Federation, 8-14. (in Russ.)
26. **Kalashnikov V.I.** (2016). Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concrete [Suspensionno-napolnennyye betonnyye smesi dlya poroshkovo-aktivirovannyh-betonov] *News of universities*, 30-37. (in Russ.)