А.В. ПУЗАТОВА¹, М.А. ДМИТРИЕВА¹, А.А. ЗАХАРОВ¹, В.Н. ЛЕЙЦИН¹
¹ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия

ЗОЛА-УНОСА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. В последние годы поиск и использование альтернативных вяжущих строительных материалов становится предметом многих исследований как в России, так и за рубежом. Это связано с тенденцией к сокращению вредного воздействия от производства строительных материалов и к более рациональному использованию доступного сырья. Зола-уноса, являясь отходом энергетической промышленности, накопленным в больших объемах в золоотвалах по всей территории России, является перспективным материалом для использования в производстве цементосодержащих строительных материалов и изделий. В статье дан обзор научной литературы и патентов по использованию золы-уноса в бетонах различного вида, а также при производстве сухих строительных смесей. На основании проведенного обзора выявлены положительные и отрицательные воздействия от введения добавки золы-уноса на свойства бетона, способы повышения эффективности использования рассматриваемых отходов при производстве строительных материалов. В экспериментальной части работы представлены результаты по определению прочности и водонепроницаемости образцов тяжелого бетона с частичной заменой цемента золой-уноса, полученной при сжигании угля на новой тепловой электростанции в Калининградской области.

Ключевые слова: зола-уноса, цемент, вяжущее, ячеистый бетон, бетон, специальные виды бетонов, сухие строительные смеси.

A. V. PUZATOVA¹, M. A. DMITRIEVA¹, A. A. ZAKHAROV¹, V. N. LEITSIN¹
¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

FLY ASH IN THE PRODUCTION OF CONCRETE FOR VARIOUS PURPOSE AND DRY CONSTRUCTION MIXTURES

Abstract. In recent years, the search for and use of alternative binder building materials has become the subject of many studies both in Russia and abroad. This is due to the trend to reduce the harmful effects of the production of building materials and to more rational use of available raw materials. Fly ash, being a waste of the energy industry, accumulated in large volumes in ash dumps throughout Russia, is a promising material for use in the production of cement-containing building materials and products. The article provides a review of scientific literature and patents on the use of fly ash in various types of concrete, as well as in the production of dry building mixtures. On the basis of the review, positive and negative effects from the introduction of fly ash additives on the properties of concrete, ways to increase the efficiency of using the considered waste in the production of building materials were identified. The experimental part of the work presents the results of determining the strength and water resistance of heavy concrete samples with partial replacement of cement with fly ash obtained by burning coal at a new thermal power plant in the Kaliningrad region.

Keywords: fly ash, cement, binder, cellular concrete, concrete, special types of concrete, dry mixes.

Введение

Современное строительное материаловедение сталкивается с такой актуальной задачей, как снижение негативного влияния от производства строительных материалов на окружающую среду.

© Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н., 2023

В первую очередь это связано с тем, что производство цемента является одной из основных отраслей промышленности, выбрасывающих большое количество CO_2 в атмосферу. Известно, что при производстве 1 тонны цемента в атмосферу выделяется около 0,85 тонн углекислого газа [1], что представляет собой большую нагрузку как на экологическую ситуацию в зоне расположения цементного завода, так и в целом на глобальную проблему повышения средней мировой температуры из-за увеличивающегося количества парниковых газов. На 21-й Конференции ООН по изменению климата COP21 в декабре 2015 года 197 стран-участников приняли Парижское соглашение о необходимости сокращения глобальных выбросов парниковых газов в атмосферу. Целью этого соглашения является стремление к ограничению повышения глобальной температуры в этом столетии до 2 градусов Цельсия при одновременном поиске средств для еще большего ограничения этого повышения до 1,5 градуса. Россия, как участник Парижского соглашения, должна достичь к 2030 году количества выбросов CO_2 не более 70% от уровня 1990 года.

Одним из путей решения этой задачи является мировое сокращение производства и потребления цемента и использования вместо него альтернативных вяжущих материалов. Этими материалами могут быть отходы других промышленности, такие, как зола-уноса – отходы от сжигания угля на тепловых электростанциях. Ежегодно в России образуется 26 млн. тонн золошлаковых отходов, из которых используется или утилизируется только 8-10% [1]. Использование золы-уноса как добавки в бетоны решает сразу несколько проблем – экологическую, с точки зрения использования отходов, и экономическую, так как использование дополнительного вяжущего материала сокращает расход цемента, а следовательно, и стоимость всей бетонной смеси.

Использование золы-уноса в бетонах не является новшеством в строительном материаловедении [2-11], но данный вопрос продолжает быть актуальным и по сей день ввиду развития топливно-энергетической промышленности. Так, в Калининградской области в 2017 году был дан старт строительству новой Приморской угольной ТЭС. В 2021 году станция была введена в эксплуатацию. С началом работ на станции стали образовываться отходы при сжигании каменного угля, и встал вопрос об утилизации этих отходов. Перспективным направлением использования этих отходов является строительная индустрия области.

В Калининградской области имеются заводы как товарного бетона, так и производства железобетонных изделий, заводы по производству блоков из ячеистого бетона и сухих строительных смесей. Для Калининградской области использование материалов, обладающих пуццолановой активностью, обосновано еще и отсутствием местного производства цемента и необходимостью завозить его из других регионов России, что связано с дополнительными издержками на транспортировку, что в свою очередь, ведет к удорожанию конечного продукта. Перспективным является применение золы-уноса новой Приморской ТЭС на всех вышеуказанных предприятиях. В связи с этим, в данной статье приведен обзор научной литературы и патентов по использованию зол-уноса ТЭС в стройиндустрии Российской Федерации и за рубежом.

Использование золы-уноса при производстве ячеистых бетонов. В последние годы исследуется получение легких пористых материалов из промышленных отходов. По сравнению с обычным бетоном, пенобетон демонстрирует большой потенциал в области утилизации промышленных отходов с высокой производительностью, поскольку прочность такого бетона не является основным свойством, учитывая область его применения. Исходя из целей устойчивого развития, настоятельно необходимо продвигать энергоэффективные здания, технологии и материалы. Зольный пенобетон – это ключ к созданию энергоэффективных зданий. Такой материал обладает пониженной теплопроводностью и улучшенной теплоизоляцией за счет замедления тепловой конвекции, теплопроводности и теплового излучения. Использование золы-уноса для приготовления пенобетонов способствует устойчивому развитию, так как происходит переработка отходов сжигания угля

тепловых станций и снижается расход цемента [12]. Сравнительный анализ ячеистых бетонов с содержанием золы-уноса Новотроицкой ТЭС показал снижение энергозатрат при производстве таких бетонов до 80% и финансовых расходов до 30%. Кроме того, подсчитан экологический эффект. Так на производство 1 тонны зольного ячеистого бетона утилизируется порядка 900 кг золы-уноса [1]. К недостаткам использования золы-уноса в пенобетонах можно отнести повышение водопоглощения незначительные изменения прочности на сжатие.

Анализ публикаций таких исследователей как А.В. Волженский, П.И. Боженков, Е.А. Галибина, В.В. Костин и других [2-11] свидетельствует о преимуществах использования высококальциевых зол в производстве ячеистых бетонов. Проведенные исследования свидетельствуют об обладании зол всеми исходными характеристиками сырья для изготовления ячеистых бетонов (дисперсность и вяжущий потенциал), к тому же ячеистая структура смягчает деструкции расширения золы в поровое пространство без развития трещин.

Рассмотренный в [13-14] опыт действующих производств изделий из автоклавных ячеистых бетонов выявил трудности при использовании высококальциевых зол, прежде всего из-за нестабильности их свойств, обусловленной значительными колебаниями состава различных зол. В связи с этим, производство автоклавных ячеистых бетонов с использованием региональных источников золы-уноса требует отдельных научных исследований по определению состава и свойств газобетонов.

Во всем мире происходит активное использование золы-уноса при производстве ячеистых бетонов [12, 15-19]. Hongyu Gao et al. [15] изучают легкий вакуумный пенобетон, содержащий золу уноса и гипс, с целью выявления степени вспенивания в вакууме и в атмосферных условиях. В исследовании зола-уноса и карбидный шлак были использованы для частичной замены цемента с целью снижения стоимости сырья. Основными компонентами золы являются оксид кремния и оксид алюминия, а основными компонентами шлака из карбида кальция являются $\text{Ca}(\text{OH})_2$, эти вещества обладают вяжущими свойствами, поэтому могут заменять собой часть цементного вяжущего.

Крупная зола-уноса может использоваться при производстве ячеистых бетонов как мелкий заполнитель [16]. Введение золы-уноса крупных фракций в состав пенобетона улучшает многие его свойства, в том числе удобоукладываемость, механическую стойкость и устойчивость к замораживанию-оттаиванию, в то время как обратное явление наблюдается в отношении водопоглощения и усадки при высыхании. Использование мелкоизмельченной золы-уноса приводит к улучшению механических свойств бетона, может снизить выделяемую при гидратации теплоту и уменьшить усадку пенобетона при высыхании без значительного изменения его механических свойств. Однако влияние крупной золы-уноса на характеристики пенобетона на данный момент менее изучено. Использование крупной золы-уноса вместо песка улучшает консистенцию пенобетона из-за эффекта сферической формы частиц и большей удельной площадью, чем у песка. Прочность на сжатие пенобетона с золой оказалась выше, чем у песчаного пенобетона ввиду большего содержания мелких частиц. В отношении морозостойкости пенобетон с содержанием золы-уноса и песка показывает наилучшую сопротивляемость замораживанию-размораживанию по сравнению с другими составами [16].

Для увеличения эффекта от применения золы-уноса при производстве ячеистых бетонов могут использоваться дополнительные минеральные добавки, например микрокремнезем [17, 18]. Для достижения баланса желаемых свойств пенобетона с высоким содержанием пены рекомендуется использование тройных цементных систем (микрокремнезем + зола уноса + цемент). В работе [18] рассматривается улучшение свойств фибропенобетонов за счет введения полипропиленовой фибры, золы-уноса и микрокремнезема. Зола-уноса в данном случае рассматривается как замена традиционному песку. Структурный фибропенобетон с разной плотностью (1000, 1300, 1600 и 1900 $\text{кг}/\text{м}^3$) и

соответствующей прочностью на сжатие 20-70 МПа использовался для исследования прочности на сжатие, изгиб и раскалывание, усадки при высыхании и ползучести. Замена песка золой-уноса привела к тому, что 28-дневная прочность пенобетона с золой составляла около 80–95% от соответствующей прочности, наблюдаемой после трех месяцев отверждения обычного пенобетона. Мелкодисперсный кремнезем и полипропиленовая фибра значительно повысили прочность пенобетона при затвердевании. Кроме того, добавление полипропиленового волокна значительно увеличило предел прочности на растяжение и увеличило сопротивление ползучести и усадку при высыхании. Таким образом, структурный фибропенобетон сегодня может использоваться в качестве заменителя легкого бетона при производстве конструкционного бетона в строительной отрасли.

Были проведены исследования механизма упрочнения легкого ячеистого бетона с золой-уноса в отношении микроструктуры, включая характеристики пористости и каркаса [19]. Изучение механизма упрочнения легкого ячеистого бетона, заполненного золой-уноса показало, что для достижения наилучшей прочности каркаса и характерных параметров пористой структуры рекомендуемое содержание золы-уноса в ячеистом бетоне составляет примерно 25%. Различия в механизме образования структурного каркаса между обычным легким ячеистым бетоном и таким же с золой-уноса происходит из-за эффекта наполнения структуры сферическими частицами золы-уноса в период до 28 дней. После 28 дней твердения пуццолановая реакция золы и реакция гидратации цемента взаимно способствуют уплотнению структуры легкого ячеистого бетона, что увеличивает его долговечность и эксплуатационные характеристики.

Существуют запатентованные технологии производства ячеистых бетонов, содержащих золу-уноса [20-23]. Патент RU 2237041 С1 описывает сырьевую смесь для изготовления конструктивного теплоизоляционного пенобетона. Зола-уноса содержится в смеси в количестве 35-39% по массе, причем количество цемента в составе равноценно золе. В данном случае введение золы вместо части цемента снижает стоимость пенобетона. Кроме того, так как зола обладает высокой удельной поверхностью (2800-5000 см²/г у золы, 2500 см²/г у цемента) происходит улучшение гранулометрического состава, увеличивается суммарная поверхность соприкосновения цементного геля с микронаполнителем, что в итоге приводит к более быстрому твердению смеси и повышенной прочности [20].

Патент RU 2543847 С2 описывает способ приготовления смеси для производства неавтоклавного композиционного ячеистого бетона естественного твердения. Сухая смесь для изготовления такого бетона содержит, кг: цемент 600, зола-уноса Рязанской ТЭЦ 400, микрокремнезем МКУ 50, суперпластификатор С-3 9, олеат натрия 3, глюконатнатрия 1,5, адимент СТ-2 2, биоцидная добавка Ластонокс 2, фибра 1,5, полимерная добавка 5, сухая порообразующая смесь 20, цеолитовая добавка, содержащая одно- или многослойные нанотрубки, 50. После перемешивания совместный сухой состав подвергают ударной механоактивации на УДА-установках. В результате происходит воздействие на процесс образования кристаллогидратов, процесс формирования фибриллярных микроструктур многомикронного порядка. Сухую смесь затворяют водой в количестве 45 л на 100 кг и тщательно перемешивают. Из-за отсутствия автоклавной обработки и возможности не применять пропарку и прогрев предлагаемый способ позволяет обеспечить существенную экономию при производстве пенобетона [21].

В патенте RU 2719895 С1 представлена бетонная смесь для приготовления пенобетона со звукопоглощающими свойствами. Такая смесь содержит цемент, известняк, гипс, золу-уноса, кварцевый песок, стеклянную крошку, поликарбосилатный гиперпластификатор, синтетический углеводородный пенообразователь, воду. Зола-уноса содержится в количестве 36-44 кг на м³. Технический результат изготовления пенобетона из такой смеси – улучшение звукопоглощающих характеристик, повышение их стабильности при одновременном упрощении технологии производства и утилизации отходов. За счет совместного использования цемента, золы-уноса, известняка и гипса повышаются физико-механические

характеристики бетона, так как синергетический эффект от совместной работы этих компонентов обеспечивает образование центров кристаллизации, что приводит в итоге к улучшению качества бетона [22].

Патент RU 2635687 С1 описывает сырьевую смесь для производства изделий из газобетона, которые могут быть использованы в домостроении для изготовления строительных блоков, а также в дорожном строительстве для изготовления бордюров, ограждений и плиток. Сырьевая смесь содержит золу уноса ТЭЦ-4 г. Омска в количестве 10,1-33% по массе. Используется зола-уноса от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна, содержащая SiO_2 не менее 45%, CaO не более 10%, SO_3 не более 3%, влажность не более 0,05%. Такая зола является кислой, в газобетоне используется как кремнеземистый наполнитель для повышения прочности и долговечности [23].

Таким образом, описанные выше преимущества и примеры использования золы-уноса при производстве ячеистых бетонов, подтверждают перспективность использования данного материала в стройиндустрии как Калининградской области в частности, так и в России в целом.

Использование золы-уноса в общестроительных бетонах. На сегодняшний день накоплен большой опыт использования золы-уноса в бетонах общестроительного назначения. В зависимости от качества золы, она может использоваться либо как добавка, обладающая пуццолановой активностью, либо как микронаполнитель или наполнитель [24]. Эффективным способом повышения активности золы является метод ее помола до определенного значения удельной поверхности в шаровых мельницах или дезинтеграторах. Таким образом можно добиться повышения прочности золосодержащих бетонов в 1,5-2 раза [25]. К негативным эффектам использования золы в бетонах можно отнести повышение усадки и, в отдельных случаях, снижение прочности в начальные сроки твердения, так как зола-уноса является медленноотверждающим пуццоланом [26].

Согласно ГОСТ 25818-2017 «Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов» золы-уноса по химическому составу делятся на кислые и основные. Кислые золы получают при сжигании антрацитовых, каменных и бурых углей, содержание оксида кальция в такой золе не более 10%. Основные золы – буроугольные, с содержанием оксида кальция более 10%. Содержание оксида кальция влияет на вяжущие свойства золы, чем больше этот показатель, тем большей пуццолановой активностью обладает зола-уноса.

В зарубежном опыте используется зола-уноса двух классов С и F в качестве альтернативы цементному вяжущему, либо как мелкий наполнитель [27-29]. Согласно данным Американского нефтяного института, зола класса С содержит высококальциевые соединения и может быть использована в качестве самостоятельного вяжущего, так как обладает достаточной пуццолановой активностью. Зола класса F содержит пониженное количество кальция, для полноценного использования такой золы в качестве вяжущего необходимо вводить в состав дополнительные источники пуццолановой активности, либо применять такую золу в качестве замены части цемента или песка.

Влияние замещения части цемента золой-уноса в количестве от 25% до 60% на прочность бетона свыше 28 дней исследуется в [28]. Для этих исследований используется низкокальциевая зола-уноса класса F. Прочность на сжатие и модуль статической упругости были измерены экспериментально в разных возрастах от 7 до 180 дней на цилиндрических образцах для всех смесей бетона, также были измерены деформация при ползучести и усадке при длительной нагрузке с уровнем напряжения 50%. Бетон с 40% содержанием золы-уноса показывает удовлетворительные характеристики в более позднем возрасте (т.е. после 28 дней) с точки зрения прочности, модуля упругости и прогиба. Было замечено, что увеличение прочности от 28 до 180 дней больше у бетона с содержанием золы-уноса, чем у обычного бетона. Ползучесть и деформация при усадке с 28 до 180 дней снижается в бетонных образцах с золой. Таким образом, эффективное использование золы-уноса улучшает механические свойства бетона из-за ее пуццолановой активности.

Особенности использования зол уноса классов С и F отражены в Патенте RU 2745041 С1 [30], который описывает способ цементирования скважин композитным цементным составом, который содержит по меньшей мере один пуццолан, ускоритель на основе хлористой и сульфатной солей и воду. Показано, что одним из возможных пуццоланов может выступать зола-уноса тепловых электростанций, которая может быть использована как отдельно, так и в комбинации с дополнительными пуццоланами (кремнеземистая пыль, зола сельскохозяйственных отходов или природные пуццоланы). Класс С содержит кремнезем и известь, при смешивании с водой образует затвердевшую массу. Класс F не содержит достаточного количества извести, поэтому для активации цементирующей реакции требуется дополнительный источник ионов кальция. Для композитного цементного состава с золой-уноса класса F дополнительно вводится известь, в некоторых случаях гидратированная известь или гидроксид кальция.

Характеристики усадки конструкционного легкого бетона плотностью 1600 кг/м^3 , содержащего соединения гликоля и золу-уноса изучаются в [31]. Отмечается, что частичная замена цемента и песка золой может уменьшить усадку легкого бетона. В этом случае прочность на сжатие увеличивается за счет дополнительной пуццолановой реакции при введении золы-уноса. Добавление золы привело к эффектам наполнения и диспергирования, а также к увеличению центров зародышеобразования и осаждения цементного теста и бетона. Использование золы для замены части песка также положительно сказалось на прочности бетона. Следовательно, использование золы для замены части цемента и части песка выгодно для легкого бетона с точки зрения как усадки при высыхании, так и прочности на сжатие.

Известен способ на производство легкого заполнителя для бетонов из сырьевой смеси, содержащей золу-уноса (пеносола) [32]. Сырьевая смесь состоит преимущественно из золы-уноса от сжигания каменных углей на ТЭС и ТЭЦ г. Новосибирска (52,5-68,5%), в меньшем количестве содержится глина (20-25%), отсеvy магматической породы (10-20%), неабразивный шлам карбида кремния (1,5-2,5%), который используется в качестве газообразующего компонента. Легкие заполнители, изготовленные из такой сырьевой смеси, могут быть эффективными для легких бетонов с пониженной теплопроводностью. За счет использования измельченных до 100 мкм отсеvов магматической породы при изготовлении легкого зольного заполнителя снижается температура прокаливания и обжига гранул заполнителей, тем самым уменьшается энергоемкость производства таких заполнителей.

Использование золы-уноса в бетонах специального назначения. К бетонам специального назначения предъявляются повышенные требования по прочности, непроницаемости, морозостойкости, долговечности и т.д. Известно, что чем плотнее бетонная смесь, тем более высокими эксплуатационными характеристиками она обладает в затвердевшем состоянии. Опыт использования золы-уноса в бетонах специального назначения представлен в [33]. Композиционное вяжущее такого бетона состоит из цемента, двух видов золы-уноса ТЭЦ Приморского края и известняка. Для повышения активности композиционное вяжущее было измельчено до удельной поверхности $600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Созданные цементно-зольные фибробетоны для малопроницаемых объектов (резервуаров и гидротехнических сооружений) имеют повышенные показатели по прочности (выше 100 МПа), а также сниженные характеристики газо-, водо- и паропроницаемости. За счет применения золы-уноса с другими активными минеральными компонентами происходит уплотнение структуры бетона, так как микросферы золы-уноса являются центрами кристаллизации новообразований, создавая плотную упаковку зерен на макроуровне. Таким образом снижается проницаемость бетона и повышаются его эксплуатационные свойства в особых условиях.

В условиях воздействия на конструкцию сульфатно-агрессивных вод могут применяться бетоны на заполнителе из каменноугольной золошлаковой смеси [34]. Такие

бетоны могут выдерживать до 300 циклов попеременного замораживания-оттаивания, иметь повышенные прочностные показатели и марку по водонепроницаемости W12 и выше.

Из патента RU 2717436 С1 [35] известно вяжущее на основе серы для растворов, бетонов и конструкций из них. В состав вяжущего входят золошлаковые отходы тепловой электростанции г. Казани в количестве 59-60% по массе. Помимо золы вяжущее содержит серные отходы нефтеперерабатывающих заводов (37-39%) и хлорид кремния IV (1-3%). Серные отходы и модифицирующую добавку (хлорид кремния) нагревают до температуры плавления, затем в расплав добавляют золошлаковые отходы. Полученное вяжущее выгружают в формы и прессуют под давлением, после остывания проводят распалубку изделия. Свойства предлагаемого вяжущего значительно улучшены по сравнению с известными прототипами вяжущего. Прочность на сжатие выше на 20-50%, прочность на изгиб – на 25-32%, морозостойкость больше на 15-24 цикла, вяжущее имеет повышенную стойкость к воздействиям хлороводородной и серной кислотам.

Из патента RU 2482146 С2 [36] известно теплозащитное покрытие для конструкций и оборудования, эксплуатируемых в условиях высоких температур и агрессивных сред. Такое покрытие состоит из полых керамических или корундовых микросфер (67-85%), вяжущего (10-30%) и воды (остальное). В качестве полых керамических микросфер используются алюмосиликатные микросферы золы-уноса с диаметром 3-150 мкм и толщиной стенок 1-6 мкм. Изобретение позволяет получить теплозащитное покрытие с повышенными теплозащитными и теплофизическими свойствами, стойкостью к вибронагрузкам и агрессивным средам.

Зола-уноса пригодна для использования при производстве «зеленого» бетона нового поколения для современного строительства [37]. Геополимерный бетон на основе золы-уноса кажется превосходным вариантом по сравнению с обычным бетоном, так как использование экономически эффективных и широкодоступных зол-уноса в качестве минеральных наполнителей в бетоне дает множество преимуществ. Хотя доказано, что геополимерный бетон на основе золы демонстрирует превосходные прочностные характеристики, аналогичные или даже превосходящие обычный бетон, его долговечность по-прежнему остается открытым вопросом, требующим дальнейшего изучения. Вместе с золой-уноса прочный геополимерный бетон представляет собой сравнительно новый, революционный и устойчивый инженерный композитный материал с рядом преимуществ, включая высокую начальную прочность и улучшенные характеристики долговечности (например, пониженную проницаемость) в агрессивных средах за счет получения более плотного бетона с небольшим размером пор. Тем не менее, производство экологически безопасных и экологически чистых бетонных композитов специального назначения с использованием техногенного сырья стало основным интересом в строительной отрасли во всем мире.

Механические свойства геополимерного бетона на основе золы-уноса с добавлением резиновой крошки и стальной фибры в условиях окружающей среды и агрессивных сернокислых условий рассматривается в [38]. Геополимерный бетон с заменой до 20% цемента золой-уноса, резиновой крошкой в количестве, равном 10% от объема мелких зерен, и стальной фиброй был изготовлен и затем выдержан в сухих условиях при температуре 60°C. Через 28 дней были проведены испытания механических свойств в среде, контактировавшей с серной кислотой. Результаты показали, что самые высокие значения прочности на сжатие и растяжение, равные 49 МПа и 4,7 МПа соответственно, принадлежали геополимерному бетону, содержащему резиновую крошку и 1% стального волокна с заменой 20% цемента золой-уноса. При контакте с кислотой в течение 90 дней бетон с 1% фибры и без цемента имел самую высокую прочность на сжатие, равную 34 МПа, показав наименьшее снижение, равное 26%. Эти значения указывают на соответствующую конструктивную прочность геополимерного бетона такого типа, который может быть использован в качестве подходящей модели для устойчивого развития как замена обычному бетону полностью на цементном вяжущем.

Использование золы-уноса при производстве сухих строительных смесей.

Накопленное количество золы-уноса на всей территории России и описанные выше преимущества делают ее отличным компонентом при производстве сухих строительных смесей (ССС). Представлен обзор использования золы-уноса различных территорий при производстве СССР и даны некоторые составы таких смесей.

В Рязанской области при производстве сухих строительных смесей используют тонкомолотую золу-уноса, получаемую при сгорании твердого топлива на местной ГРЭС [39]. С помощью математического моделирования эксперимента удалось установить, что использование золы-уноса в составах СССР улучшает их пластические свойства, ускоряет гидратацию, а также способствует структурообразованию смесей. Отмечается повышенная прочность смесей при введении количестве золы от 30% до 50% от массы вяжущего, что наиболее целесообразно для кладочных растворов.

В работе [40] представлен оптимальный состав СССР на основе отходов промышленности, не содержащих вредные примесей. Представлен состав СССР, содержащий: цемент (10-12%), глину (15-18%), карбонатный песок (17,5-22,5%), кварцевый песок (30,5-42,5%) и золу-уноса ТЭС (15-20%). Для придания золе дополнительной активности, ее предварительно измельчали в бегунах до тонкодисперсного состояния (до 0,14 мм). На основе разработанной СССР получены растворы с оптимальными физико-механическими свойствами, соответствующими маркам М30-М100.

В [41] разработан состав с содержанием золы-уноса и известково-карбонатной пыли (ИКП), который был успешно апробирован на заводах по производству СССР. Отмечается соответствие физико-механических свойств разработанного состава требованиям нормативных документов. Введение добавки карбонатной извести в данном случае ускоряет твердение цементно-зольных растворов как в раннем, так и в более позднем возрасте, способствует увеличению объема гидратных новообразований, формированию кристаллизационной структуры цементного камня. При расходе цемента до 200 кг/м³, золы 100-150 кг/м³, ИКП 50-100 кг/м³ представляется возможным получение растворов с прочностью 20-30 МПа.

Влияние золы-уноса ТЭЦ-2 г. Улан-Уде на вязкость сухих строительных систем исследовано в [42]. Отмечается, что введение золы-уноса повышает динамическую вязкость и предельное напряжение сдвига композиционных вяжущих на цементной основе. Это оказывает большое значение на технологические и физико-механические свойства СССР. Рассматриваемая зола-уноса относится к низкокальциевым, которые имеют высокое содержание кристаллической фазы (70% масс.) в виде кремнезема и глинозема, содержание стеклофазы составляет 30% масс [43].

Использование золы-уноса Омской ТЭЦ при производстве СССР для кладочных и штукатурных работ представлено в работе [44]. В исследуемых составах отмечается увеличение водопотребности на 18-20% при улучшении реологических свойств. При производстве эффективных СССР рекомендуется проводить совместный помол вяжущего с наполнителем в сухом виде. С помощью такой технологии повышаются свойства наполнителя, а также физико-механические показатели получаемых растворных смесей.

Исследования СССР с использованием гипсового вяжущего и техногенных отходов Чеченской Республики, представленных золой-уноса, показаны в [45]. Установлено, что такие СССР перспективны для применения в кладочных и штукатурных работах, а добавление тонкомолотой золы-уноса местной ТЭЦ выступает в качестве активной минеральной добавки в сухих строительных смесях.

Материалы и методы

В данном исследовании использовалась зола-уноса новой Приморской ТЭС Калининградской области. Характеристики золы, соответствие ГОСТ и перспективность использования в строительном секторе региона представлены в работе [46]. Была проведена оценка применимости золы в качестве частичной замены вяжущего в составе тяжелого

бетона класса В25. Для этого были определены прочностные образцы контрольного и зольного бетона в возрасте 28 суток, а также влияние содержания золы на водонепроницаемость бетона. Изготовлены серии образцов трех составов бетона: контрольного, с 15% и 30% замещением цемента золой-уноса. Расход материалов на 1м³ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Расход материалов на 1м³ бетонной смеси с различным содержанием золы-уноса

Маркировка состава	Количество золы-уноса по массе от вяжущего, %	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Суперпластификатор Stachement 2598, кг	Зола-уноса, кг	Вода, кг
ЗУ0	0	410	780	970	2,26	-	165
ЗУ15	15	348,5	780	970	2,26	61,5	165
ЗУ30	30	287	780	970	2,26	123	165

Прочность цементно-зольного бетона определялась при соблюдении требований и указаний ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» посредством измерения минимальных усилий, разрушающих изготовленные образцы бетона в виде кубов размером 100х100х100 мм при их статистическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки, и последующим вычислением напряжений при этих усилиях.

Исследование водонепроницаемости бетона велось в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» методом «мокрого пятна». Были изготовлены серии из шести контрольных образцов-цилиндров и образцов с содержанием 30% золы по ГОСТ 10180-2012, которые устанавливались в гнезда аппарата для испытания бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4.01, обеспечивающую подачу воды к нижней торцевой поверхности образцов, поддержание ее давления, а также фиксацию времени «мокрого пятна» на каждом из образцов. Водонепроницаемость серии образцов оценивалась максимальным давлением, при котором не менее чем на четырех из шести образцов не наблюдалась фильтрация воды.

Результаты исследования и их анализ

Результаты по прочности контрольных образцов и образцов цементно-зольного бетона представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения прочности

Маркировка образцов	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность в возрасте 28 суток R ₂₈ , МПа	Средняя прочность в возрасте 28 суток R ₂₈ , МПа
ЗУ0-1	2395,1	68,46	70,04
ЗУ0-2		72,27	
ЗУ0-3		67,66	
ЗУ0-4		71,76	
ЗУ15-1	2367	68,73	68,24
ЗУ15-2		70,12	
ЗУ15-3		68,58	
ЗУ15-4		65,51	
ЗУ30-1	2345	60,84	61,38
ЗУ30-2		58,13	
ЗУ30-3		61,9	
ЗУ30-4		64,63	

Как видно из результатов, прочность тяжелого бетона при добавлении в него золы-уноса Приморской ТЭС взамен части вяжущего имеет нисходящую тенденцию. При этом содержание золы в размере 15% понижает прочность бетона примерно на 3%, при содержании золы в 30-ти процентной дозировке значение прочности составляет 87% от прочности контрольных образцов.

Результаты испытаний на водонепроницаемость представлены для контрольного состава и состава с 30% золы в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения водонепроницаемости

Состав	Содержание золы-уноса взамен вяжущего, %	Максимальное давление воды, при котором на 4-х из 6-ти образцов не наблюдалась фильтрация, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
ЗУ0	0	0,8	W8
ЗУ30	30	0,4	W4

Результаты испытаний показали, что при добавлении в бетон приморской золы-уноса в размере 30% от массы вяжущего, водонепроницаемость бетона значительно ухудшается. У образцов на золоцементном вяжущем наблюдалась фильтрация уже при давлении воды в 0,4 МПа в то время, когда у контрольных образцов фильтрация наступала при давлении 0,8 МПа, а давление на отдельных образцах до момента начала фильтрации было более 1,0 МПа.

Выводы

В данной статье приведен обзор литературы по использованию золы-уноса при изготовлении бетонов различного назначения и производстве сухих строительных смесей. В зависимости от качества золы и ее химического состава, она может быть использована как замена части цемента при производстве бетонов и ССС, либо как микронаполнитель или заполнитель. При анализе литературы по теме были сформулированы следующие преимущества, недостатки и решения для широкого внедрения использования применения золы-уноса в строительном материаловедении:

- Преимущества: снижение энергозатрат и финансовых расходов при производстве стройматериалов; снижение расхода цемента; улучшение удобоукладываемости бетонной смеси, механической стойкости и устойчивости к замораживанию-оттаиванию; уплотнение структуры бетонной смеси; улучшение гранулометрического состава; повышение долговечности; повышенная стойкость золосодержащих конструкций при эксплуатации в агрессивных условиях.
- Недостатки: повышение водопоглощения; в некоторых случаях уменьшение прочности на начальных сроках твердения; увеличение усадки при высыхании; нестабильность свойств золы в зависимости от свойств угля, режима сгорания и состава золы.
- Решение: использование мелкоизмельченной золы; введение дополнительных минеральных добавок; совместный помол золы-уноса с цементом и добавками; определение свойств золы-уноса каждой партии перед использованием.

Экспериментальные исследования по введению золы-уноса Приморской ТЭС Калининградской области вместо части вяжущего в состав тяжелого бетона класса В25 не показали положительных результатов. Прочность на сжатие 28-суточных образцов снизилась на 13% при замене 30% цемента на золу-уноса. Также в два раза снизилась марка по водонепроницаемости. Можно сделать вывод, что зола-уноса Приморской ТЭС может быть использована в качестве микронаполнителя, а не как замена вяжущего. Также стоит подвергнуть золу дополнительной обработке с целью повышения физико-механических характеристик зольно-цементного бетона, на что будут направлены дальнейшие исследования.

Использование золы-уноса в строительной индустрии решает сразу несколько проблем – утилизацию большого количества накопленной золы в золоотвалах по всей территории России, сокращение расхода цемента и удешевление стоимости конечного продукта. Таким образом, активное использование золы-уноса в производстве строительных материалов и изделий ведет российскую и мировую строительную отрасль к более современному, экологичному и разумному потреблению ресурсов, энергии и сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бикбау М.Я., Жарко В.И. Энергосбережение и экология производства наноцементов. О возможности снижения удельных затрат топлива и выбросов газов при производстве цемента // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2015. № 7-8 (198-199). С. 22-25.
2. Данакин Д.Н., Кожухова Н.И. Разработка ячеистых бетонов на основе зол-уноса // VII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство»: сборник материалов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 554-558.
3. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
4. Боженков П.И. Технология автоклавных материалов. Л.: Стройиздат, 1978. 327 с.
5. Галибина Е.А. Автоклавные строительные материалы из отходов ТЭЦ. Л.: Стройиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. 128 с.
6. Костин В.В. Получение и свойства газобетонов, наполненных золами. Автореферат на соискание учёной степени к.т.н. М., 1993.
7. Чернышов Е.М. Закономерности развития структуры автоклавных материалов // *Строительные материалы*. 1992. №11. С. 28-31.
8. Овчаренко Г.И. Золой углей КАТЭКа в строительных материалах. Красноярск: Изд-во Краснояр. Ун-та, 1992. 216 с.
9. Рунова Р.Ф., Плохий В.П., Дехно А.Л., Яменко А.Б. Особенности структурообразования вяжущего на основе высокоуглеродистых зол // *Цемент*. 1995. № 3. С. 38-41.
10. Андреев В.В., Халин В.А., Политов И.П. Автоклавные материалы на основе зол ТЭЦ // *Сб. Тр./ВНИИЭСМ*. М.:1992. № 9. С. 23-43.
11. Козлова В.К. Основные направления использования зол и золошлаковых смесей ТЭЦ Сибири в производстве строительных материалов и в строительстве // *Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура*. 1990. № 10. С. 60-63.
12. Ощепков И.А., Худоносова З.А. Активизация вяжущих свойств высококальциевых зол-уноса тепловых электростанций и перспектива экономии цемента в строительстве // *Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура*. 1995. № 12. С. 64-69.
13. Chen Y., Guan L., Zhu S., Chen W. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling // *Construction and Building Materials*. 2021. № 273. 121685.
14. Черных К.П., Овчаренко Г.И., Францен В.Б. Технология, стабилизирующая свойства газобетона на основе высококальциевых зол // *Труды научно-технической юбилейной конференции «Современные строительные материалы»*. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2000. С. 47-48.
15. Овчаренко Г.И., Францен В.Б., Черных К.П. Золой ТЭЦ углей КАБ в качестве сырьевого компонента для производства газобетона // *Международной научно-практической конференции «Гуманизм и строительство на пороге третьего тысячелетия»: тезисы докладов*. Барнаул: изд-во Алт ГТУ. 1999. С. 129.
16. Gao H., Wang W., Liao H., Cheng F. Characterization of light foamed concrete containing fly ash and desulfurization gypsum for wall insulation prepared with vacuum foaming process // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 281. 122411.
17. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X., Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 170. С. 153-166.
18. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. No. 194. С. 1-11.
19. Mugahed Amran Y.H., Alyousef R., Alabduljabbar H., Khudhair M.H.R., Hejazi F., Alaskar A., Alrshoudi F., Siddika A. Performance properties of structural fibred-foamed concrete // *Results in Engineering*. 2020. No. 5. 100092.
20. Liu X., Ni C., Meng K., Zhang L., Liu D., Sun L. Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 251. 118954.
21. Патент RU 2237041 С1, Российская Федерация, МПК С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления конструктивного теплоизоляционного пенобетона: № 2003111123/03, Заявл. 17.04.2003: Опубл.

- 27.09.2004 / П.Ф. Собкалов, В.М. Бертов; патентообладатель(и): Открытое акционерное общество "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева".
22. Патент RU 2543847 C2, Российская Федерация, МПК C04B 38/02, C04B 38/10, B82B 3/00. Способ приготовления смеси для производства композиционного ячеистого бетона: № 2013131123/03, Заявл. 05.07.2013; Оpubл. 10.03.2015 / Е. Н. Ястремский, И. А. Емельянов.
23. Патент RU 2719895 C1, Российская Федерация, МПК C04B 38/10. Бетонная смесь: № 2019121054, Заявл. 03.07.2019; Оpubл. 23.04.2020 / Р.С. Федюк, А.В. Баранов, Ю.Л. Лисейцев, В.С. Лесовик, Е.А. Попов; патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владивостокский государственный университет экономики и сервиса" (ВГУЭС).
24. Патент RU 2635687 C1, Российская Федерация, МПК C04B 38/02, C04B 38/10, C04B 40/02. Сырьевая смесь для газобетона: № 2016122858, Заявл. 08.06.2016; Оpubл. 15.11.2017 / О.В. Чемисенко, Ю.Л. Брейтер, Е.Н. Полоумова; патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет".
25. Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Эффективный заполнитель для конструкционных бетонов на основе золы-уноса // Апробация. 2013. № 3(6). С. 56-60.
26. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Хмелевский М.В., Стась П.П. Режим перемешивания компонентов при изготовлении бетона с добавкой золы уноса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 1. С. 201-210.
27. Коровкин М.О., Калашников В.И., Ерошкина Н.А. Влияние высококальциевой золы-уноса на свойства самоуплотняющегося бетона // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 1(22). С. 49-53.
28. Jani P., Imqam A. Class C fly ash-based alkali activated cement as a potential alternative cement for CO2 storage applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. № 201. 108408.
29. Fuzail Hashmi A., Shariq M., Baqi A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2021. № 283. 122772.
30. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds // Construction and Building Materials. 2018. №170. С. 153-166.
31. Патент RU 2745041 C1, Российская Федерация, МПК E21B 33/138, C04B 28/02, C09K 8/467, C04B 22/08, C04B 40/00, C04B 22/16, C04B 103/14. Ускорители для композитных цементных составов: № 2019121706, Заявл. 22.02.2017; Оpubл. 18.03.2021 / Т.Д. Писклак, Ш.У. Риджо, Р.Г. Морган, Т.С. Содхи, С.Е.А. Ламзден, С.Дж. Льюис; Хэллибертон энерджи сервисиз, Инк.
32. Chindaprasirt P., Rattanasak U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash // Materials & Design. 2011. № 32(2). С. 723-727.
33. Патент RU 2479518 C1, Российская Федерация, МПК C04B 18/06. Сырьевая смесь для производства легкого заполнителя бетонов (пеносола): № 2011137771/03, Заявл. 13.09.2011; Оpubл. 20.04.2014 / В.А. Кутолин, В.А. Широких; патентообладатель(и): Учреждение Российской академии наук Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (Институт геологии и минералогии СО РАН, ИГМ СО РАН).
34. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1346-1356.
35. Попов С.В., Брагинский В.Г., Давиденко В.П. Исследование специальных свойств бетона на заполнителях из золошлаковых смесей ТЭС // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2010. № 5-1(85). С. 135-139.
36. Патент RU 2717436 C1, Российская Федерация, МПК C04B 28/36, C01B 17/00, C04B 7/28, C04B 111/20. Вяжущее: № 2019115562, Заявл. 21.05.2019; Оpubл. 24.03.2020 / Р.Т. Ахметова, Г.А. Медведева, А.А. Юсупова, Л.Р. Бараева, А.Ю. Ахметова, А.И. Хацринов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ").
37. Патент RU 2482146 C2, Российская Федерация, МПК C09D 5/00, C09D 1/00. Высокотемпературное теплозащитное покрытие: № 2011136161/05, Заявл. 31.05.2011; Оpubл. 20.05.2013 / Ю.А. Григорьев; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "ОВК-Россия"
38. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties // Construction and Building Materials. 2021. №270. 121857.
39. Moghaddam S.C., Madandoust R., Jamshidi M., Nikbin I.M. Mechanical properties of fly ash-based geopolymers concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions // Construction and Building Materials. 2021. № 281. 122571.
40. Шалаев А.Г., Шалаева М.А., Антоненко Н.А. Использование золы-уноса для решения экологических проблем сухих строительных смесей // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Рязань, 17–19 апреля 2019 года. Рязань:

Рязанский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2020. С. 200-203.

41. Бондарь А.В., Ковальский В.П. Использование отходов для производства строительных материалов // Северная Пальмира: IX Молодежной экологической конференции: сборник научных трудов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 2018. С. 148-151.

42. Дворкин Л.И., Житковский В.В. Сухие строительные смеси с добавкой известково-карбонатной пыли // Сухие строительные смеси. 2018. № 4. С. 13-16.

43. Бадмаева Э.В., Урханова Л.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния минеральных добавок на вязкость композиционных вяжущих для сухих строительных смесей // Актуальные вопросы строительного материаловедения: материалы всероссийской научно-практической конференции. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова. 2021. С. 6-9.

44. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бадмаева Э.В. Исследование влияния минеральных добавок на свойства и фазовый состав композиционных вяжущих для сухих строительных смесей // Вестник ВСГУТУ. 2021. № 4(83). С. 79-84.

45. Ращупкина М.А., Симачева Э.Э., Скворцова Н.В. Получение эффективных сухих строительных смесей для кладочных и штукатурных работ // III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации»: сборник материалов. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 385-390.

46. Чернышева Н.В., Муртазаев С.А.Ю., Аслаханова А.Х. Сухие строительные смеси на основе КГВ // Сухие строительные смеси. 2012. № 1. С. 12-13.

47. Zakharov A., Puzatova A, Dmitrieva M., Leitsin V. Prospects for the Use of Fly Ash from a Thermal Power Plant of the Kaliningrad Region in the Construction Industry // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. № 168. С. 105-116.

REFERENCES

1. Bikbau M.YA., Zharko V.I. Energoberezhniye i ekologiya proizvodstva nanotsementov. O vozmozhnosti snizheniya udel'nykh zatrat topliva i vybrosov gazov pri proizvodstve tsementa [Energy saving and ecology of nanocement production. On the possibility of reducing the specific fuel consumption and gas emissions in the production of cement]. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2015. No. 7-8 (198-199). Pp. 22-25. (rus)

2. Danakin D.N., Kozhukhova N.I. Razrabotka yacheistykh betonov na osnove zol-unosa [Development of cellular concrete based on fly ash]. *VII International Youth Forum "Education. The science. Production": Conference Proceedings*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. Pp. 554-558. (rus)

3. Volzhenskiy A.B. Mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva [Mineral binders]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 464 p. (rus)

4. Bozhenov P.I. Tekhnologiya avtoklavnykh materialov [Technology of autoclave materials]. Leningrad: Stroyizdat, 1978. 327 p. (rus)

5. Galibina E.A. Avtoklavnyye stroitel'nyye materialy iz otkhodov TETS [Autoclave building materials from CHP waste]. Leningrad: Stroyizdat. Leningrad. Department, 1986. 128 p. (rus)

6. Kostin V.V. Polucheniye i svoystva gazobetonov, napolnennykh zolami [Obtaining and properties of aerated concrete filled with ash]. Abstract for the degree of Ph.D. M., 1993. (rus)

7. Chernyshov Ye.M. Zakonomernosti razvitiya struktury avtoklavnykh materialov [Patterns of the development of the structure of autoclave materials]. *Stroitel'nyye materialy*. 1992. No. 11. Pp. 28-31. (rus)

8. Ovcharenko G.I. Zoly ugley KATEKa v stroitel'nykh materialakh [Ashes of KATEK coals in building materials]. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. Un-ta, 1992. 216 p. (rus)

9. Runova R.F., Plokhii V.P., Dekhno A.L., Yamenko A.B. Osobennosti strukturoobrazovaniya vyazhushchego na osnove vysokouglerodistykh zol [Peculiarities of structure formation of a binder based on high-carbon ash]. *Cement*. 1995. No. 3. Pp. 38-41. (rus)

10. Andreyev V.V., Khalin V.A., Politov I.P. Avtoklavnyye materialy na osnove zol TETS [Autoclave materials based on CHP ash]. Moscow: VNIIESM. 1992. No. 9. Pp.23-43. (rus)

11. Kozlova V.K. Osnovnyye napravleniya ispol'zovaniya zol i zoloshlakovykh smesey TETS Sibiri v proizvodstve stroitel'nykh materialov i v stroitel'stve [The main directions of the use of ashes and ash and slag mixtures from Siberian thermal power plants in the production of building materials and in construction]. *Izvestiya vuzov. Seriya str-vo i arkhitektura*. 1990. No. 10. Pp. 60-63. (rus)

12. Oshchepkov I.A., Khudonosova Z.A. Aktivizatsiya vyazhushchikh svoystv vysokokal'tsiyevykh zol-unosa teplovykh elektrostantsiy i perspektiva ekonomii tsementa v stroitel'stve [Activation of binding properties of

- high-calcium fly ash from thermal power plants and the prospect of saving cement in construction]. *Izvestiya vuzov. Seriya str-vo i arkhitektura*. 1995. No. 12. Pp. 64-69. (rus)
13. Chen Y., Guan L., Zhu S., Chen W. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 273. 121685. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121685
14. Chernykh K.P., Ovcharenko G.I., Frantsen V.B. Tekhnologiya, stabiliziruyushaya svoystva gazobetona na osnove vysokokal'tsiyevykh zol [Technology stabilizing the properties of aerated concrete based on high-calcium ash]. *Proceedings of the scientific and technical anniversary conference "Modern Building Materials"*. Novosibirsk: Izd-vo NGASU, 2000. Pp. 47-48. (rus)
15. Ovcharenko G.I., Frantsen V.B., Chernykh K.P. Zoly TETS ugley KAB v kachestve syr'yevogo komponenta dlya proizvodstva gazobetona [Ashes of thermal power plant of KAB coals as a raw material component for the production of aerated concrete]. International scientific-practical conference "Humanism and construction on the threshold of the third millennium": abstracts. Barnaul: publishing house Alt GTU. 1999. Pp. 129. (rus)
16. Gao H., Wang W., Liao H., Cheng F. Characterization of light foamed concrete containing fly ash and desulfurization gypsum for wall insulation prepared with vacuum foaming process. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 281. 122411. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122411.
17. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X., Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 170, Pp. 153-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207.
18. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 194. Pp. 1-11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036.
19. Mugahed Amran Y.H., Alyousef R., Alabduljabbar H., Khudhair M.H.R., Hejazi F., Alaskar A., Alrshoudi F., Siddika A. Performance properties of structural fibred-foamed concrete. *Results in Engineering*. 2020. No. 5. 100092. doi:10.1016/j.rineng.2019.100092.
20. Liu X., Ni C., Meng K., Zhang L., Liu D., Sun L. Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 251. 118954. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118954.
21. Patent RU 2237041 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/10. Raw mix for the manufacture of structural heat-insulating foam concrete: No. 2003111123/03, Appl. 04/17/2003: Published. 09/27/2004 / P.F. Sobkalov, V.M. Bertov; patentee(s): Open Joint Stock Company "All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev".
22. Patent RU 2543847 C2, Russian Federation, IPC C04B 38/02, C04B 38/10, B82B 3/00. Method for preparing a mixture for the production of composite cellular concrete: No. 2013131123/03, Appl. 07/05/2013: Published. 03/10/2015 / E. N. Yastremsky, I. A. Emelyanov.
23. Patent RU 2719895 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/10. Concrete mix: No. 2019121054, Appl. 07/03/2019: Published. 04/23/2020 / R.S. Fedyuk, A.V. Baranov, Yu.L. Liseytssev, V.S. Lesovik, E.A. Popov; patent holder(s): Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladivostok State University of Economics and Service" (VGUES).
24. Patent RU 2635687 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/02, C04B 38/10, C04B 40/02. Raw mix for aerated concrete: No. 2016122858, Appl. 06/08/2016: Published. 11/15/2017 / O.V. Chemisenko, Yu.L. Breiter, E.N. Poloumova; patent holder(s): Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Technical University".
25. Fomina I.V., Kapustin F.L. Effektivnyy zapolnitel' dlya konstruktsionnykh betonov na osnove zoly-unos [Efficient filler for structural concrete based on fly ash]. *Aprobatsiya*. 2013. No. 3(6). Pp. 56-60. (rus)
26. Golik V.I., Dmitrak YU.V., Khmelevskiy M.V., Stas' P.P. Rezhim peremeshivaniya komponentov pri izgotovlenii betona s dobavkoy zoly unosa [The mode of mixing components in the manufacture of concrete with the addition of fly ash]. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019. No. 1. Pp. 201-210. (rus)
27. Korovkin M.O., Kalashnikov V.I., Yeroshkina N.A. Vliyaniye vysokokal'tsiyevoy zoly-unosa na svoystva samouplotnyayushchegosya betona [Influence of high-calcium fly ash on the properties of self-compacting concrete]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 1(22). Pp. 49-53. (rus)
28. Jani P., Imqam A. Class C fly ash-based alkali activated cement as a potential alternative cement for CO2 storage applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. No. 201. 108408. doi:10.1016/j.petrol.2021.108408
29. Fuzail Hashmi A., Shariq M., Baqi A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 283. 122772. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122772.
30. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 170. Pp. 153-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207.
31. Patent RU 2745041 C1, Russian Federation, IPC E21B 33/138, C04B 28/02, C09K 8/467, C04B 22/08, C04B 40/00, C04B 22/16, C04B 103/14. Accelerators for composite cement compositions: No. 2019121706, Appl.

- 02/22/2017: Published. 03/18/2021 / T.D. Pisklak, Sh.U. Rijo, R.G. Morgan, T.S. Sodhi, S.E.A. Lamzden, S.J. Lewis; Halliburton Energy Services, Inc.
32. Chindaprasirt P., Rattanasak U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. *Materials & Design*. 2011. No. 32(2). Pp. 723-727. doi:10.1016/j.matdes.2010.07.036
33. Patent RU 2479518 C1, Russian Federation, IPC C04B 18/06. Raw mix for the production of lightweight concrete aggregate (penosol): No. 2011137771/03, Appl. 09/13/2011: Published. 04/20/2014 / V.A. Kutolin, V.A. wide; patentee(s): Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute of Geology and Mineralogy im. V.S. Sobolev of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, IGM SB RAS).
34. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. Povysheniye effektivnosti malopronitsayemykh tsementnykh kompozitov [Improving the efficiency of low-permeability cement composites]. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 10. Pp. 1346-1356. (rus)
35. Popov S.V., Braginskiy V.G., Davidenko V.P. Issledovaniye spetsial'nykh svoystv betona na zapolnitelyakh iz zoloshlakovykh smesey TES [Investigation of the special properties of concrete on aggregates from ash and slag mixtures at TPPs]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2010. No. 5-1(85). Pp. 135-139. (rus)
36. Patent RU 2717436 C1, Russian Federation, IPC C04B 28/36, C01B 17/00, C04B 7/28, C04B 111/20. Binder: No. 2019115562, Appl. 05/21/2019: Published. 03/24/2020 / R.T. Akhmetova, G.A. Medvedev, A.A. Yusupova, L.R. Baraeva, A.Yu. Akhmetova, A.I. Khatsrinov; patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FGBOU VO "KNRTU").
37. Patent RU 2482146 C2, Russian Federation, IPC C09D 5/00, C09D 1/00. High-temperature heat-shielding coating: No. 2011136161/05, Appl. 05/31/2011: Published. 05/20/2013 / Yu.A. Grigoriev; patent holder: Limited Liability Company "OVK-Russia"
38. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 270. 121857. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121857
39. Moghaddam S.C., Madandoust R., Jamshidi M., Nikbin I.M. Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 281. 122571. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122571
40. Shalayev A.G., Shalayeva M.A., Antonenko N.A. Ispol'zovaniye zoly-unosa dlya resheniya ekologicheskikh problem sukhikh stroitel'nykh smesey [The use of fly ash to solve the environmental problems of dry building mixtures]. *New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference*. Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2020. Pp. 200-203. (rus)
41. Bondar' A.V., Koval'skiy V.P. Ispol'zovaniye otkhodov dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [The use of waste for the production of building materials]. *Northern Palmyra: IX Youth Ecological Conference: Conference Proceedings*. St. Petersburg: St. Petersburg Research Center for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences, 2018. Pp. 148-151. (rus)
42. Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V. Sukhiye stroitel'nyye smesi s dobavkoy izvestkovo-karbonatnoy pyli [Dry construction mixtures with the addition of lime-carbonate dust]. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2018. No. 4. Pp. 13-16. (rus)
43. Badmayeva E.V., Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A. Issledovaniye vliyaniya mineral'nykh dobavok na vyazkost' kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya sukhikh stroitel'nykh smesey [Investigation of the influence of mineral additives on the viscosity of composite binders for dry building mixtures]. *Topical issues of building materials science: Conference Proceedings*. Ulan-Ude: Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, 2021. Pp. 6-9. (rus)
44. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Badmayeva E.V. Issledovaniye vliyaniya mineral'nykh dobavok na svoystva i fazovyy sostav kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya sukhikh stroitel'nykh smesey [Study of the influence of mineral additives on the properties and phase composition of composite binders for dry building mixtures]. *Vestnik VSGUTU*. 2021. No. 4(83). Pp. 79-84. (rus)
45. Rashchupkina M.A., Simacheva E.E., Skvortsova N.V. Polucheniye effektivnykh sukhikh stroitel'nykh smesey dlya kladochnykh i shtukaturnykh rabot [Obtaining effective dry building mixes for masonry and plastering]. *III International Scientific and Practical Conference "Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations": Conference Proceedings*. Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 2019. Pp. 385-390. (rus)
46. Chernysheva N.V., Murtazayev S.A.YU., Aslakhanova A.KH. Sukhiye stroitel'nyye smesi na osnove KGV [Dry building mixes based on KGV]. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2012. No. 1. Pp. 12-13. (rus)
47. Zakharov A., Puzatova A, Dmitrieva M., Leitsin V. Prospects for the Use of Fly Ash from a Thermal Power Plant of the Kaliningrad Region in the Construction Industry. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. No. 168. Pp. 105-116. doi:10.1007/978-3-030-91145-4_11.

Информация об авторах:

Пузатова Анастасия Вячеславовна

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия, старший преподаватель ОНК «Институт высоких технологий», зав. лабораторией строительных материалов.
E-mail: asharanova@kantiana.ru

Дмитриева Мария Александровна

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия, доктор физико-математических наук, профессор ОНК «Институт высоких технологий».
E-mail: ADmitrieva@kantiana.ru

Захаров Александр Анатольевич

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия, студент магистратуры направления «Современные строительные материалы и технологии».
E-mail: zakhorov2@gmail.com

Лейцин Владимир Нояхович

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия, доктор физико-математических наук, профессор ОНК «Институт высоких технологий».
E-mail: VLeitsin@kantiana.ru

Information about authors:

Puzatova Anastasiia V.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, senior lecturer of the Institute of High Technologies, head of building materials laboratory.
E-mail: asharanova@kantiana.ru

Dmitrieva Maria A.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Institute of High Technologies.
E-mail: ADmitrieva@kantiana.ru

Zakharov Alexander An.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, master's degree student of Modern building materials and technologies.
E-mail: zakhorov2@gmail.com

Leitsin Vladimir N.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Institute of High Technologies.
E-mail: VLeitsin@kantiana.ru