



Безобжиговый зольный гравий как крупный заполнитель бетонов

Cold-bonded fly ash aggregate as a coarse aggregate of concrete

К.Ю. Усанова^{1*}, Ю.Г. Барабанщиков², Ю.П. Федоренко³,
С.А. Костыря⁴

K.Usanova^{1*}, Yu.Barabanshchikov², Yu.Fedorenko³,
S.Kostyrya⁴

¹⁻² Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹⁻² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

³⁻⁴ АО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 195220, Санкт-
Петербург, ул. Гжатская, д.21

³⁻⁴ B.E. Vedeneev VNIIG", JSC, 21, Gzhatskaya St.,
Saint Petersburg, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

зольный гравий;
безобжиговый зольный гравий;
обжиговый зольный гравий;
гранулированная зола уноса;
бетон;
цемент;

KEYWORDS

fly ash aggregate;
cold bonded fly ash aggregate;
sintered fly ash aggregate pelletized fly ash;
granulated fly ash;
concrete;
cement;

АННОТАЦИЯ

Приведен краткий обзор исследования бетонов с крупным заполнителем из зольного гравия, получаемого из золы уноса угольных ТЭС и ТЭЦ. Выполненные авторами экспериментальные исследования безобжигового зольного гравия Новосибирской ТЭЦ-5 (г. Новосибирск, Россия). Исследованы насыпная плотность, водопоглощение, прочность на сжатие в цилиндре и морозостойкость безобжигового зольного гравия. Установлено, что водопоглощение крупного заполнителя составляет 6,1 %, а прочность заполнителя при сдавливании в цилиндре - 6,2 МПа. Полученные характеристики заполнителей показывают их возможность использования в конструкционных бетонах с легкими заполнителями.

ABSTRACT

The paper presents a brief study of fly ash lightweight aggregate concretes with aggregate obtained from fly ash of coal-fired thermal power plants. The research analyzes the cold-bonded fly ash aggregate from the Novosibirskaya GRES Thermal Power Plant (Novosibirsk, Russia). The paper experimentally investigates bulk density, water absorption, bulk crushing resistance, resistance to freezing and thawing. The experimental study shows that the water absorption of the coarse aggregate reaches 6.1%, while a cylinder compressive strength of aggregate accounts for 6.2 MPa. The obtained characteristics show that the analyzed aggregates can be effectively used in lightweight structural concrete.

Содержание

1.	Введение	31
2.	Методы	41
3.	Результаты и обсуждение	41
4.	Заключение	42

1. Введение

1.1 Утилизация золошлаковых отходов ТЭС

Одно из направлений переработки золошлаковых отходов ТЭС – использование их в качестве сырья для бетона, а также для изготовления искусственных заполнителей бетона. Использование золошлаковых отходов в качестве замещающих материалов при изготовлении бетона и его заполнителей

является актуальным по причине недостатка природных заполнителей из гравия и гранитного щебня и истощения их месторождений.

Число публикаций по данной теме увеличивается начиная с 2002 года, отражая растущий интерес исследователей к данной теме. Наибольшее число публикаций сделано исследователями из Турции и Индии. Это показывает активное использование угля в энергетике этих стран и неполное решение задачи утилизации золошлаковых отходов.

Одним из ценных компонентов золошлаковых отходов является зола уноса (fly ash), применяемая в частности в виде искусственного зольного гравия (гранул, окатышей, fly ash aggregate, pelletized fly ash, granulated fly ash). На рис.1 приведено распределение публикаций по годам по данным Scopus по запросу (TITLE-ABS-KEY ("fly ash aggregate") OR TITLE-ABS-KEY ("pelletized fly ash") OR TITLE-ABS-KEY ("granulated fly ash")) AND TITLE-ABS-KEY (concrete OR cement).

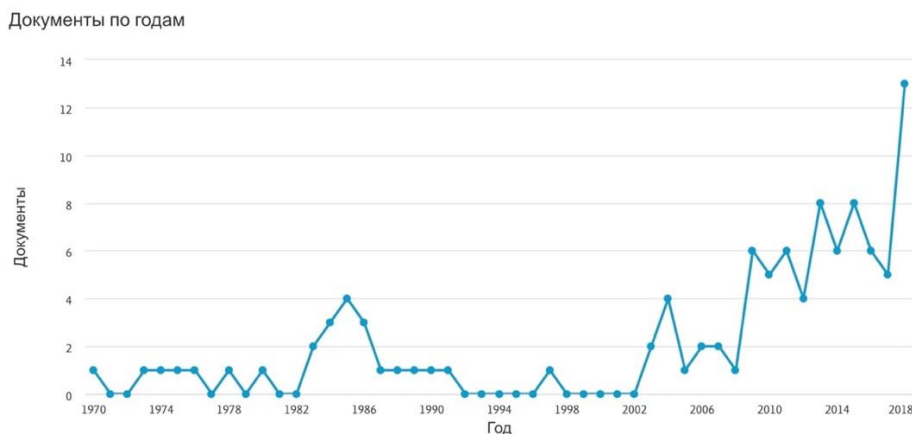


Рисунок 1. Распределение публикаций по годам

Видно, что число научных публикаций по данной теме резко растет, особенно после 2008 года, что показывает актуальность исследований.

1.2 Использование золы уноса в бетонных смесях

Использование золы уноса при изготовлении бетона можно разделить на два вида: в качестве крупного заполнителя (рис.2), получаемого методом обжиговой или безобжиговой грануляции золы (зольный гравий), и в виде мелкодисперсного наполнителя.



Рисунок 2. Внешний вид зольного гравия, использовавшегося в эксперименте

Применение мелкодисперсной золы в бетоне служит нескольким целям: экономии цемента, в результате частичной его замены, улучшению свойств и характеристик бетонной смеси (например, трещинообразование при усадке) и утилизации золы уноса, как промышленного отхода.

1.3 Бетоны с зольным гравием различного назначения

Зольный гравий применяется в высококачественных бетонах (high performance concrete), в самоуплотняющихся бетонных смесях (self-compacting concrete) и в легких бетонах (lightweight concrete).

Для высококачественных бетонов применение зольного гравия позволяет уменьшить стоимость бетона при сохранении его основных свойств.

В самоуплотняющихся бетонах округлая форма зольного гравия и его относительно небольшой размер повышает подвижность бетона и его удобоукладываемость, особенно при густом армировании. Подобные смеси легче подаются бетононасосами.

Использование зольного гравия в легких бетонах снижает его плотность и улучшает его теплотехнические характеристики.

1.4 Обжиговый и безобжиговый зольный гравий для бетона

Крупный заполнитель из золы уноса получают двумя способами. Первый способ – гранулирование золы уноса с последующим спеканием гранул при высоких температурах в печах (обжиговый зольный гравий). Второй способ – холодное гранулирование золы уноса путем ее окатывания во вращающихся емкостях (безобжиговый зольный гравий).

Совместное использование обжигового и безобжигового зольного гравия в бетонной смеси рассмотрено в исследовании [1]. Авторы рассчитали степень заполнения объема бетона крупным заполнителем, используя совместно обжиговый зольный гравий, безобжиговый зольный гравий и мелкий заполнитель. Исследовалось влияние формы зольного гравия на свойства самоуплотняющегося бетона. Сравнивались свойства свежего, схватившегося и набравшего прочность самоуплотняющегося бетона с обычным крупным заполнителем и с искусственным заполнителем - зольным гравием. Было обнаружено, что бетонная смесь с зольным гравием имеет более высокую удобоукладываемость, благодаря округлой форме зерен заполнителя. Кроме этого такая бетонная имеет лучшие механические свойства и большую долговечность, чем все другие исследуемые бетонные смеси [1].

В исследованиях [2–5] сравнивались свойства бетонов с обжиговым и безобжиговым зольным гравием.

В статье [2] показано влияние свойств зольного гравия, таких как прочность, пористость, водопоглощение, средняя плотность и удельный вес, на прочность и долговечность легкого бетона. Использовались обжиговый зольный гравий, безобжиговый зольный гравий и обычный заполнитель. Замещение обычного заполнителя зольным гравием уменьшало прочность бетона из-за более высокой пористости и меньшей прочности заполнителя. Однако водонепроницаемость легкого бетона с обжиговым зольным гравием была немного выше, чем у бетона с обычным заполнителем, тогда как водонепроницаемость легкого бетона с безобжиговым зольным гравием была ниже, чем у других бетонов. Все бетоны выдерживали более 85 циклов замораживания и оттаивания. Было показано, что легкие бетоны с зольным гравием могут иметь сопоставимые с обычными бетонами характеристики [2].

В исследовании [3] изучались механические свойства бетона с зольным гравием. Сравнивались физико-механические свойства безобжигового зольного гравия и обжигового зольного гравия. Подбором гранулометрического состава заполнителя обеспечивалась максимальная плотность бетонной смеси. Эксперименты показали большую механическую прочность бетона с обжиговым зольным гравием по сравнению с бетоном с безобжиговым зольным гравием. Кроме того, итоговая прочность бетона повышалась при уменьшении соотношения объема крупного заполнителя к объему цементного раствора. Обжиговый зольный гравий (62 % по объему бетона) обеспечивал прочность на сжатие бетона 39,97 МПа. Увеличение прочности наблюдалось в образцах с зольным гравием при воздействии перегретого пара или отверждения горячей водой [3].

Экспериментально исследовалась долговечность легких бетонов [4] с безобжиговым либо обжиговым зольным гравием. Были исследованы две бетонные смеси с соотношением вода/вяжущее 0,35 и 0,55. Изучалось влияние добавок микрокремнезема и ультратонкой стальной фибры на свойства легкого бетона с безобжиговым либо обжиговым зольным гравием. Оценивались прочность на сжатие, долговечность, проницаемость для ионов хлорида, газопроницаемость и коррозионная стойкость. Результаты экспериментов показали, что бетоны с обжиговым зольным гравием имеют лучшие характеристики, чем бетоны с безобжиговым зольным гравием. Также добавление стальной фибры повышало коррозионную стойкость бетона [4].

Статья [5] является обзором применения обжигового и безобжигового зольного гравия.

1.5 Безобжиговый зольный гравий для бетона

Примером исследования бетона с безобжиговым зольным гравием являются работы [6–15], [16–24].

В статье [6] исследовалась прочность на сжатие, сорбция воды, проницаемость для ионов хлорида и газопроницаемость бетонов, содержащих различные объемы безобжигового зольного гравия. При производстве бетона использовалось фиксированное количество легкого зольного гравия и различные количества мелкого заполнителя из золы уноса. Использование мелкого заполнителя из золы уноса было достигнуто путем объемного замещения мелкого заполнителя с пятью различными уровнями замещения, а именно: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % и 100 %. Таким образом для этого экспериментального исследования были изготовлены пять различных бетонных смесей. Полученные бетоны были разделены на две части, одна из которых была первоначально отверждена паром, а другая - затворена водой. Пропаривание

существенно ускоряло набор прочности. Показано, что легкий бетон со 100 % легким заполнителем, имеющим удельный вес 1773 кг/м^3 , достигает прочности 21,3 МПа в течение 24 часов [6].

В исследованиях [7, 8] представлено влияние характеристик четырех типов крупных заполнителей (двух типов обжигового зольного гравия, безобжигового зольного гравия и измельченного известнякового заполнителя нормального веса) на прочность бетона на сжатие, на растяжение и на модуль упругости бетонов. Для достижения требуемых усадки и содержания воздуха в легких бетонах использовалось меньшее количество химических добавок, чем в бетоне нормального веса, что привело к снижению производственных затрат на такой бетон. Использование легких заполнителей вместо обычных заполнителей в производстве бетона несколько уменьшило его прочность. Автором предложены аппроксимационные зависимости для полученных экспериментальных результатов [7, 8].

В исследовании [9] показано влияние нанокремнезема и стальной фибры на проводимость капилляров бетона и прочность на сжатие бетона с безобжиговым зольным гравием, активированного щелочью. В работе рассмотрели двадцать четыре варианта геополимерных бетонов с безобжиговым зольным гравием, добавками нанокремнезема и стальной фибры с концентрацией гидроксида натрия 12 М и с отверждением при температуре окружающей среды. Исследовали водонепроницаемость, водопоглощение и газопроницаемость бетона. Результаты показали, что прочность на сжатие геополимерного бетона с безобжиговым зольным гравием составляет 28,23 МПа после 28 дней отверждения и 36,62 МПа после 90 дней отверждения. Добавление 2 % нанокремнезема и 1 % стальной фибры вызвали значительное улучшение исследуемых свойств бетона [9].

В работе [10] проведены исследования фазовых характеристик, физических свойств и прочности безобжигового зольного гравия. В экспериментах использовали золу уноса с высоким содержанием кальция и портландцемент или гидроксид кальция как связующее вещество в количестве 5-15 % по массе для получения заполнителя. В результате экспериментов в заполнителях такого типа были обнаружены повышенная плотность и предел прочности в сочетании с низким водопоглощением. Это связано с одновременным проявлением, как гидратации, так и пуццолановой реакции в бетонной смеси. Кроме того, результаты термогравиметрии свидетельствуют о том, что во всех смесях наблюдались гидраты силиката кальция, гидроксида кальция и карбоната кальция, в то время как эттрингит также присутствовал в зольном гравии со связующим из портландцемента. Обнаружено, что оптимальное содержание портландцемента и гидроксида кальция составляет 10 % и 5 % по массе соответственно. Самый высокий предел прочности заполнителей был получен при добавлении к золе портландцемента в количестве 10 % по массе [10].

В работе [11] рассматривается влияние измельченного гранулированного доменного шлака и гидроксида натрия (NaOH) на физико-механические свойства геополимерного бетона с зольным гравием. Заполнитель был приготовлен из золы уноса класса С методом гранулирования без добавления каких-либо связующих. Использовали два способа отверждения заполнителя: выдерживание во влажных условиях (водоотверждаемый заполнитель) и химическое отверждение с использованием раствора NaOH (химически отверждаемый заполнитель). Были испытаны следующие свойства заполнителя: прочность на сжатие, водопоглощение и удельный вес. Прочность химически отверждаемого заполнителя была на 64,93 % и на 49,03 % больше чем водоотверждаемого заполнителя в течение 7 и 28 дней соответственно. Водопоглощение химически отверждаемого заполнителя составило 4,0 % через 7 дней и 4,2 % через 28 дней. Также были исследованы смеси геополимерного бетона с химически отверждаемым заполнителем и водоотверждаемым заполнителем при 0 % и 30 % замены золы уноса (класса F) гранулированным доменным шлаком с различными концентрациями растворов NaOH (8 М, 10 М, 12 М). Выявлено, что бетон с 30 % содержанием гранулированного доменного шлака с концентрацией 12 М NaOH достигает максимальной прочности на сжатие - 64,14 МПа и 42,13 МПа. Кроме того было обнаружено, что смеси геополимерных бетонов с химически отверждаемым заполнителем имеют лучшую удобоукладываемость и сцепление в межфазной переходной зоне [11].

Авторы работы [12] рассмотрели использование золы уноса и каменной пыли для производства крупного заполнителя для бетона. Были определены механические свойства такого бетона: прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости. Исследовались следующие параметры: содержание заполнителей, соотношение вода/вяжущее, влияние температуры и тип заполнителя. Обнаружено, что прочность бетона с безобжиговым зольным гравием полностью теряется при воздействии определенной предельной температуры. Определена предельная температура для бетона с зольным гравием - 300 °С и для бетона с заполнителем из каменной пыли - 400 °С. Выявлено, что разные значения предельной температуры связаны с разницей в процессах грануляции золы уноса и каменной пыли во время холодного окатывания. Сканы расколотого заполнителя на поверхности трещины в образце, сделанные электронным микроскопом, показывают образование и расширение пустот из-за воздействия высокой температуры. Разработаны регрессионные модели для прогнозирования механических свойств. Настоящее исследование дает представление о масштабах использования безобжигового зольного гравия в бетоне, подверженному воздействию температуры [12].

В исследовании [13] рассмотрены механические и разрушающие свойства стальной фибры железобетона с безобжиговым зольным гравием. Бетоны с зольным гравием были изготовлены с

постоянным в/ц соотношением 0,40 и двумя различными объемными фракциями заполнителей. Также были использованы три типа стальной фибры с анкерами на концах с соотношением длины фибры к ее диаметру 55, 65 и 80 и с четырьмя различными содержаниями фракций стальной фибры (0,35%, 0,70%, 1,00% и 1,50%) от объема бетона. Было исследовано влияние соотношения длины фибры к ее диаметру, объемной доли стальной фибры и содержания заполнителя на прочность на сжатие, на прочность на растяжение, на предел прочности на изгиб, а также на модуль упругости, энергию разрушения и характерную длину бетона после 28-дневного выдерживания бетона во влажных условиях. Результаты испытаний показали, что использование стальной фибры существенно увеличивает прочность на растяжение, предел прочности на изгиб, энергию разрушения и характерную длину. Однако добавление стальной фибры не значительно изменило прочность на сжатие бетона [13].

Работа [14] посвящена реологическому поведению самоуплотняющейся бетонной смеси с замещением обычного заполнителя безобжиговым зольным гравием. Для получения зольного гравия сухую порошковую смесь из 90 % золы уноса и 10 % портландцемента по весу гранулировали путем увлажнения во вращающейся наклонной емкости при температуре окружающей среды с последующим отверждением в течение 28 дней. Было произведено семнадцать бетонных смесей с фиксированным распылом конуса и с использованием различных по количеству суперпластификаторов. Увеличение содержания мелкого и/или крупного заполнителя одновременно уменьшало плотность и пластическую вязкость бетонной смеси и делало ее менее восприимчивой к тексотропности смеси. Между тем, увеличение содержания зольного гравия позволило уменьшить количество суперпластификаторов, необходимых для обеспечения удобоукладываемости. При полной замене легкими заполнителями в виде зольного гравия удобоукладываемость снизилась на 25 % из-за плотности свежееуложенного самоуплотняющегося бетона [14].

В исследовании [15] в качестве самоотверждающихся компонентов в самоуплотняющемся бетоне использовали керамзит и зольный гравий. Данные компоненты использовались в качестве внутреннего накопителя влаги. Крупный заполнитель заменяли на керамзит в объеме 5 %, а мелкий заполнитель был уменьшен за счёт добавления золы уноса, как вяжущего, от 0 % до 50 % по весу мелкого заполнителя. Результаты испытаний показали, что смесь самоуплотняющегося бетона с 40 % золы уноса достигала более высокой прочности при традиционном отверждении водой. Кроме того, смесь с 30 % золы уноса показала более высокую прочность при самоотверждении. Показано, что самоуплотняющийся бетон с заполнителем из керамзита и зольного гравия можно успешно использовать в качестве самоотверждающихся компонентов там, где традиционное отверждение неэффективно [15].

В исследовании [16] рассмотрено влияние щелочных активаторов на инициирование реакции полимеризации алюмосиликатных минералов, присутствующих в золе уноса класса F. Были проанализированы различные типы заполнителей из золы уноса со связующими (бентонит и метакаолин) с большим содержанием силикатов. Проанализировано влияние щелочных активаторов на прочность бетона и проведено всестороннее исследование физико-механических свойств зольного гравия. В исследовании была изготовлена установка для гранулирования золы уноса для получения зольного гравия. Эффективность и прочность гранул улучшалась путем смешивания золы уноса с различными связующими материалами, такими как гранулированный доменный шлак, метакаолин и бентонит. Кроме того, активацию связующих с золой уноса проводили с использованием гидроксида натрия для улучшения вяжущих свойств. Бетонные смеси были спроектированы и изготовлены с использованием различных заполнителей на основе золы уноса, содержащих различные ингредиенты. Затвердевшие бетонные образцы были испытаны для оценки механических свойств. Результаты испытаний показали, что золошлаковые заполнители с щелочным активатором при 10 М проявляют самые высокие показатели разрушающей нагрузки равные 22,81 МПа. Аналогичным образом, бетонная смесь с 20 %-ным содержанием золошлакового заполнителя показала максимальную прочность на сжатие 31,98 МПа. Было обнаружено, что зольный гравий, содержащий различные вяжущие, обладает хорошими механическими свойствами и может быть использован для бетонов средней прочности [16].

Цель исследования [17] - оценка влияния различных соотношений золы уноса в бетонной смеси. Геополимер на основе золы уноса сравнивался с обычным портландцементом по прочности на сжатие бетона. В геополимерном бетоне рассматривались следующие соотношения золы уноса и заполнителя: 50 % к 50 %, 40 % к 60 %, 30 % к 70 %, 20 % к 80 %. Те же соотношения были использованы и для бетона с обычным портландцементом. Были проведены испытания на прочность бетона, измерение плотности, водопоглощения и пористости. Результаты показали, что геополимер на основе золы уноса с соотношением золы уноса и заполнителя 30 % к 70 % обеспечивает максимальную прочность на сжатие по сравнению с бетоном на основе портландцемента после отверждения бетона на 1, 7 и 28 день. Плотность геополимерного бетона сопоставима с бетоном на основе портландцемента. Водопоглощение и пористость геополимерного бетона оказались ниже, чем у бетона на основе портландцемента. Данные испытаний показали, что соответствующий подбор смеси может обеспечить хорошее качество геополимерного бетона на основе золы уноса [17].

Авторы работы [18] провели испытания на прочность сцепления между арматурным стержнем и бетоном с безобжиговым зольным гравием. Исследовался бетон с добавлением стальной фибры и без

нее. Спроектированный бетон имел постоянное в/ц соотношение равное 0,4 и содержание цемента 400 кг/м³. В исследовании использовали три типа стальной фибры с анкерами на концах с соотношениями длины фибры к ее диаметру 55, 65 и 80 и с четырьмя различными содержаниями фракций стальной фибры (0,35 %, 0,70 %, 1,00 % и 1,50 %) от объема бетона. Эффективность соотношения размеров, объемной доли стальной фибры и содержание заполнителя в отношении прочности сцепления исследовали после 28-дневного твердения. С помощью общей линейной модели дисперсионного анализа авторы проанализировали дисперсию экспериментальных данных, дали оценку коэффициентов вариации содержания заполнителя, соотношения длины фибры к ее диаметру и объемного содержания стальной фибры с прочностью сцепления между арматурным стержнем и бетоном с безобжиговым зольным гравием. Кроме того, была предложена математическая модель для прогнозирования прочности сцепления. Результаты испытания на сцепление путем выдергивания стержня из бетона показали, что использование стальной фибры повышает прочность сцепления арматурного стержня с бетоном с безобжиговым зольным гравием [18].

В статье [19] сообщается об исследовании механических свойств стальной фибры, содержащейся в неармированных бетонах и бетонах с микрокремнеземом с безобжиговым зольным гравием. Для исследования были спроектированы две партии бетона с соотношением вода/вяжущее 0,35 и 0,55. Включение стальной фибры в работу было достигнуто путем 10 %-ной замены массы цемента микрокремнеземом. Использовались два типа стальной фибры с анкерами на концах: фибры с длиной 60 мм и отношением длины к диаметру 80 и фибры с длиной 30 мм и отношением длины к диаметру 40. Во всех бетонных смесях было использовано 90 % безобжигового зольного гравия и 10 % портландцемента. После 28-дневного твердения бетона авторы провели испытания на прочность при сжатии, предел прочности при разрыве и прочность сцепления между арматурой и бетоном. После был проведен анализ дисперсии экспериментальных результатов и определены значимые факторы механических характеристик бетона. Кроме того, была проведена корреляция экспериментальных данных для мониторинга взаимодействия механических свойств и прочности сцепления арматурного стержня с бетоном. Результаты показали, что включение в работу стальной фибры и использование ее различных типов значительно улучшают механические свойства бетонов независимо от отношения вода/вяжущее [19].

В исследовании [20] изучена возможность использования зольного гравия для уменьшения усадки бетона. Для проведения экспериментов были использованы бетонные смеси марки М40 с 30 %, 60 % и 100 % заменой природного гравия на зольный гравий. Были проведены испытания на прочность на сжатие, температурные воздействия и пластическую усадку для изучения прочности бетона и уменьшения его усадки. Результаты испытаний сравнивались с результатами испытаний бетона с природным заполнителем из гравия [20].

Авторы статьи [21] разработали эмпирические модели для удобоукладываемости и прочности на сжатие бетона с безобжиговым зольным гравием посредством статистически разработанных экспериментов на основе методологии поверхности отклика в виде подбора параметров состава смеси, таких как содержание цемента, содержание воды и объемная доля безобжигового зольного гравия. Расход цемента принимался от 250 до 450 кг/м³, чтобы создать слабую или прочную матрицу бетона. Было обнаружено, что помимо содержания воды, удобоукладываемость бетонной смеси сильно зависит от объемной доли безобжигового зольного гравия в его составе. Поверхность отклика указывает на то, что увеличение содержания цемента приводит к изменению преобладающего типа разрушения: от разрушения матрицы бетона до полного разрушения. При этом прочность бетона уменьшается с увеличением объемной доли заполнителя. Разработанные модели можно использовать для установления типовой взаимосвязи в подборе расхода смеси для бетона с безобжиговым зольным гравием [21].

В работе [22] исследовали уменьшение усадочных трещин в легких бетонах, изготовленных с безобжиговым зольным гравием. Для производства крупного заполнителя были использованы два типа золы уноса с различными физическими и химическими свойствами и с различной прочностью. Впоследствии поверхность заполнителя с более низкой прочностью обработали жидким стеклом и цементно-кремнеземной суспензией для улучшения их физических и механических свойств. Для испытаний было разработано восемь бетонных смесей с в/ц соотношением 0,35 и 0,55 с использованием четырех типов легких крупных заполнителей, отличающихся по текстуре поверхности, плотности, водопоглощению и прочности. Для испытаний на усадочную трещиностойкость были использованы образцы округлого типа. Кроме этого, в работе были исследованы свободная усадка, ползучесть, потеря веса бетона, прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости бетона. Результаты показали, что подбором свойств изучаемого зольного гравия можно увеличить период трещинообразования бетонов, что приводит к формированию в бетоне более мелких трещин, связанных с меньшей свободной усадкой. Кроме того, наблюдалось заметное увеличение прочности на растяжение, сжатие и срез, а также модуль упругости [22].

Авторы работы [23] исследовали влияние трещинообразования цилиндрических образцов из легкого бетона с безобжиговым зольным гравием и мелким заполнителем из природного песка. Был рассмотрен легкий бетон с добавкой микрокремнезема и без него при в/ц соотношениях от 0,32 до 0,55. Объемное

содержание крупного заполнителя составило 30 %, 45 % и 60 % от общего объема заполнителя в смесях. Были отлиты и испытаны на прочность на сжатие, статический модуль упругости, прочность на растяжение, свободную усадку, потерю веса, ползучесть и стесненную усадку двенадцать бетонных смесей с легкими заполнителями. Результаты экспериментов показали раскрытие трещин на цилиндрических образцах более 2 мм для всех бетонов. Усилилась свободная усадка, потеря веса и максимальное раскрытие трещины, в то время как прочность на сжатие и на срез, статический модуль упругости и удельная ползучесть уменьшились с увеличением содержания крупного заполнителя. Использование микрокремнезема улучшило механические свойства, но отрицательно сказалась на усадке легкого бетона. Усадочное трещинообразование легкого бетона оказалось значительно меньше, чем у обычного бетона [23].

В исследовании [24] рассмотрена пластичность легкого бетона с безобжиговым зольным гравием, полученным методом холодного гранулирования увлажненной смеси золы и цемента при комнатной температуре. В качестве мелкого заполнителя был выбран природный песок. Исследовались образцы из легкого бетона с микрокремнеземом и без него с в/ц соотношением 0,35 и 0,55. Крупный заполнитель был включен в смеси при 30 %, 45 % и 60 % от общего объема заполнителя и с максимальными размерами частиц 9,5 и 16 мм. Таким образом, были разработаны и испытаны двадцать четыре бетонные смеси для оценки прочности на сжатие, статического модуля упругости и сопротивление разрыву. В дополнение, было проведено испытание на трехточечный изгиб на надрезанных балках для определения сопротивления развитию трещины и характерной длины в качестве меры пластичности. Результаты испытаний показали, что пластичность легких бетонов увеличилась при более высоком содержании крупного заполнителя в объеме и большим размером частиц и уменьшилась с использованием микрокремнезема и низкого значения в/ц соотношения бетона. Кроме того, характерная длина уменьшилась с увеличением прочности на сжатие, как в обычном бетоне [24].

1.6 Обжиговый зольный гравий для бетона

Результаты исследований бетона с обжиговым зольным гравием представлены в работах [25–35], [36–43].

В статье [25] представлены результаты экспериментального исследования по производству искусственного зольного гравия. Для активации золы уноса использовались щелочные растворы, силикат натрия и гидроксид натрия. Щелочной раствор содержит 4,5 % Na_2O , $\text{Si}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Отверждение искусственного зольного гравия осуществляли при температуре окружающей среды и при нагревании (от 60 до 80 °C) при шести уровнях длительности нагревания. Оптимальная температура и продолжительность отверждения имеют важное значение в реакции геополимеризации для достижения хороших характеристик полученного гравия. Характеристики зольного гравия улучшались с увеличением температуры и продолжительности отверждения в печи [25].

В работе [26] уравнение Болломея используется для связи в/ц отношения и прочности на сжатие бетона, содержащего традиционные заполнители, которые обладают большей прочностью, чем цементная матрица. Это линейное уравнение, не учитывающее явно параметры, описывающие крупные заполнители. На прочность легких бетонов с зольным гравием влияет как в/ц отношение, так и свойства крупных заполнителей (прочность и объем сорбции воды). В этой статье предлагается модифицированное уравнение Болломея, косвенно учитывающее наличие зольного гравия. Уравнение базируется на экспериментальных данных, полученных автором для легких бетонов с обжиговым зольным гравием и верифицировано с использованием результатов, опубликованных другими исследователями [26].

Исследование [28] посвящено изготовлению поризованного бетона с обжиговым зольным гравием. Поризованный бетон был получен из смеси трех различных размеров обжигового зольного гравия (4,75 мм, 9,5 мм, 12,5 мм), портландцемента, воды и небольшого количества песка или без песка. Для повышения прочности бетона в бетонную смесь добавлялись микрокремнезем и суперпластификатор. Испытывали поризованные бетоны с различным в/ц соотношением: 0,30, 0,35 и 0,40. Определялись пористость, водонепроницаемость и прочность на сжатие. Показано, что при твердении бетона в течение 28 дней его прочность на сжатие составляет 7,15-15,74 МПа и водонепроницаемость - 9,38-16,07 мм/с при пористости 27,59-34,05 %.

В исследовании [29] рассмотрены механические характеристики бетона с обжиговым зольным гравием, как с использованием стальной фибры, так и без нее. Сравнивались характеристики природных заполнителей бетона с обжиговым зольным гравием. Спроектированные бетонные смеси были получены для бетона класса M30 по стандарту Индии. Замену крупных природных заполнителей осуществили обжиговым зольным гравием в процентном соотношении 20 %, 40 % и 60 % от количества крупного заполнителя. Добавление такого типа искусственного заполнителя показало улучшение удобоукладываемости бетонной смеси. Замена в бетоне традиционных заполнителей на обжиговый зольный гравий увеличило усадку и снизило параметры прочности бетона. При 40 % замене обжиговым зольным гравием и добавлением стальной фибры прочность на сжатие составила 42,6 МПа. Были изучены механические свойства: прочность на сжатие, прочность на растяжение, сопротивление изгибу,

модуль упругости и эффективность бетона с обжиговым зольным гравием с точки зрения работы конструкции, как с добавлением в бетон стальной фибры, так без нее. Было показано, что включение фибры значительно улучшило механические свойства бетона [29].

Авторы работы [30] исследовали зольный гравий из золы уноса ТЭЦ Seyitomer Thermal Power Plant (Турция). После определения физических и химических свойств золы уноса, были изготовлены различные типы гранул из золы уноса с вяжущим из известняка и гипса, которые смешивались в пяти различных соотношениях. Было обнаружено, что наиболее прочные гранулы состоят из смеси золы уноса (88 %), извести (6 %) и гипса (6 %). Далее было получено три типа легкого бетона путем смешивания различных соотношений портландцемента (16 %, 20 %, 24 %) с легкими искусственными заполнителями. Бетоны прошли несколько механических испытаний после 1, 3, 7, 14 и 28 дней отверждения для определения прочности на сжатие и прочности при изгибе. Плотность бетонных образцов была ниже 2 т/м^3 . Согласно результатам испытаний, бетон с добавлением 20 % цемента оказался самым прочным из испытанных [30].

В исследовании [31] обжиговый зольный гравий был обработан теплом и полимером для получения заполнителей, отличающихся по прочности, водопоглощению и пуццолановой активности. Эти свойства заполнителей определялись изменениями в их микроструктуре. Исследовалась прочность бетонов при неизменном в/ц отношении, но с разными типами заполнителей. Было показано, что прочность бетона не может быть объяснена только прочностью заполнителя, и предположено, что водопоглощение и пуццолановая активность заполнителя может влиять на прочность бетона [31].

В статье [32] показывают возможности разных типов золы уноса для изготовления искусственного обжигового зольного гравия для бетона с целью достижения параметров легкого высокопрочного бетона. Интересным аспектом оценки качества композита является синергетическое взаимодействие заполнителя, соединенного с цементным тестом. Рассмотрены варианты создания бетона разных классов прочности, в том числе высокопрочного бетона, достигающего прочности до 55 МПа. [32].

В работе [33] показано, что бетон с обжиговым зольным гравием на 22 % легче и в то же время на 20 % прочнее, чем обычный бетон, а усадка при высыхании примерно на 33 % меньше, чем у обычного бетона. Уменьшение количества цемента до 20 % не влияет на прочность бетона [33].

Целью работы [34] является снижение в/ц отношения в лёгком конструкционном бетоне путем поглощения воды легким заполнителем. Исследование проводилось на восемнадцати бетонных образцах с обжиговым зольным гравием и цементного теста с разным в/ц отношением. Было продемонстрировано, что скорость и степень поглощения воды заполнителем в бетоне зависят не только от его водопоглощения, но также и от наличия влаги, влажностного состояния, процедуры подготовки бетона и его состава. Кроме того, доказано, что стандартный метод расчета так называемого эффективного в/ц отношения является точным только в случае высокого начального содержания влаги в легком заполнителе. Когда используется сухой обжиговый зольный гравий, стандартный метод дает недооцененные значения в/ц отношения по сравнению с его фактическими значениями, определенными в тестах. Эффект поглощения воды затворения легким заполнителем, выявленный в испытаниях свежееуложенного бетона, в виде уменьшения в/ц отношения, отражался на набирающей прочность бетоне по мере набора прочности. Увеличение прочности оказалось выше для смесей с более высоким содержанием легкого заполнителя. Хотя пористый заполнитель является самым слабым элементом в легком конструкционном бетоне, в этом случае его более высокое содержание может быть компенсировано более прочной цементной матрицей, возникающей в результате снижения водоцементного соотношения [34].

В исследовании [35] показано использование обжигового зольного гравия в различных применениях: насыпи, слои-фильтры, а также легкий бетон [35].

Легкий бетон с обжиговым зольным гравием [27] сравнивался с обычным бетоном с крупным заполнителем из гранитного щебня с различными соотношениями вода/вяжущее от 0,30 до 0,50. Оба бетона имели одни и те же объемные пропорции. Единственная разница между ними была в виде используемого крупного заполнителя. Результаты испытаний показали, что при полном замещении заполнителя из гранитного щебня легким заполнителем наблюдалось уменьшение плотности бетона на 20 %. Легкие бетонные смеси демонстрировали более высокую удобоукладываемость, чем обычные бетонные смеси. За исключением модуля упругости, все другие свойства, такие как прочность на сжатие, прочность на растяжение и проницаемость для хлорида натрия легких бетонных смесей были близки со свойствами обычных бетонных смесей при соотношении вода/связующее 0,45 и 0,5. Было обнаружено, что отношение прочности на растяжение к прочности на сжатие легкого бетона аналогичны отношениям как у обычного бетона [27].

В работе [36] основное внимание уделяется влиянию стальной фибры на свойства легкого конструкционного бетона с обжиговым зольным гравием. Исследовались два типа бетонов с разными плотностями и прочностью на сжатие. Бетоны были модифицированы стальной фиброй с массовым содержанием 30, 45 и 60 кг/м^3 . Применяемые количества стальной фибры не привели к значительному ухудшению реологических параметров бетонных смесей. Несмотря на относительно низкое объемное содержание волокон, наблюдалось значительное увеличение прочности на изгиб и растяжение. Волокна также улучшали усадку бетона и постпиковую деформативность при одноосном сжатии. Влияние стальной

фибры на прочность на сжатие оказалось зависящим от типа образца. Модуль упругости бетона с обжиговым заполнителем не изменялся при добавлении стальной фибры [36].

В статье [37] представлены результаты исследования, предпринятого для повышения качества легкого бетона с зольным гравием за счет добавления фибры из бутадиен-стирольного латекса и стали. Были проведены испытания на прочность на сжатие, растяжение, изгиб и удар. Кроме того, были изучены характеристики энергопоглощения и напряжение возникновения трещины. Проведены испытания на долговечность, включая водопоглощение, водонепроницаемость и проницаемость для хлорида, устойчивость к солевым и сульфатным атакам. Результаты показывают, что добавление латекса улучшило прочностные свойства, энергопоглощение и критические напряжения возникновения трещин, как в бетонах без стальной фибры, так и в бетонах с ней. С точки зрения прочности, водопоглощения, водонепроницаемости и проницаемости для хлорида, соляные и сульфатные атаки уменьшаются. Это объясняется латексом, образующим тонкие пленки в порах и в транзитных зонах гидратированных цементных паст. Наличие латекса оказалось полезным для улучшения общих свойств легких бетонов [37].

Авторы работы [38] рассмотрели влияние различных легких заполнителей из золы уноса на характеристики бетонных смесей. Эксплуатационные характеристики легких бетонов и бетонов с обычным весом оценивались по прочности на сжатие, модулю упругости, прочности на растяжение, проницаемости для ионов хлора и посредством быстрого замораживания и оттаивания. Чтобы исследовать межфазную переходную зону были проведены наблюдения сканирующим электронным микроскопом. Также были проведены регрессионный и графический анализ полученных экспериментальных данных. Увеличение прочности на сжатие бетона наблюдалось одновременно с увеличением его плотности, измеренной после сушки в сушильном шкафу. Было обнаружено, что отношение прочности на растяжение к прочности на сжатие бетонов с заполнителями из золы уноса аналогичны показателям обычного бетона. Все 28- и 56-дневные бетонные образцы выдерживали более 85 и 90 циклов замораживания и оттаивания соответственно [38].

В исследовании [39] высокопрочные бетонные плиты с зольным гравием подвергались воздействию 2 %-ного раствора хлорида в течение 15 месяцев. Определялось проникновение иона хлора, потенциал электрохимической коррозии, плотность тока коррозии и удельное электросопротивление. Эти плиты сравнивались с плитами из обычного тяжелого бетона средней и высокой прочности. Результаты показали, что легкие высокопрочные бетонные плиты с зольным гравием имели наименьшую концентрацию хлорида. Значения плотности тока коррозии были очень низкими, а значения электросопротивления очень высокими и указывали на чрезвычайно низкий электрический ток коррозии. Показано, что плотная матрица легкого высокопрочного бетона ограничивает открытые поры, которые могут переносить ионы хлора. Заполнитель из золы уноса понижал диффузию хлорида и дополнительно способствовал уменьшению концентрации вредных ионов хлорида. В дополнение пористый обжиговый зольный гравий действовал как буферный резервуар для раствора, насыщенного хлоридом, и, таким образом, препятствовал достижению ионами хлора поверхности арматурной стали [39].

Исследовано [40] влияние полипропиленовых и стальных фибр на высокопрочный бетон. В бетоне использовался крупный заполнитель в виде обжигового зольного гравия, а мелкий заполнитель был частично заменен золой уноса. Изучена прочность бетона на сжатие, прочность на растяжение, предел прочности при разрыве, модуль упругости, зависимость деформаций от напряжений и вязкость при сжатии. По сравнению с легким бетоном с обжиговым зольным гравием добавление полипропиленовой фибры в количестве 0,56 % по объему бетона вызвало 90 %-ное увеличение не прямой прочности на растяжение и 20 %-ное увеличение прочности на разрыв. Добавление полипропиленовой фибры существенно не повлияло на другие механические свойства бетона. Стальная фибра в количестве 1,7 % по объему бетона вызвала увеличение не прямой прочности на растяжение примерно на 118 % и увеличение прочности на разрыв примерно на 80 %. Армирование стальной фиброй также вызвало небольшое снижение модуля упругости и изменило форму графика напряжение-деформация, сделав ее более криволинейной. Было зарегистрировано значительное увеличение ударной вязкости при сжатии. Это свидетельствует о значительном усилении пластичности при использовании арматуры из стальной фибры [40].

В работе [41] исследовались свойства обжигового зольного гравия. Удобоукладываемость различных бетонных смесей измеряли с помощью испытания на осадку конуса. Данное испытание отражало различие в объемной плотности бетонных смесей. Показано, что легкий бетон с зольным гравием не давал усадку в той же степени, что и обычный бетон той же консистенции. Добавки микрокремнезема и суперпластификаторов незначительно увеличили прочность и плотность бетона. Усадка при высыхании бетона с зольным гравием была выше, чем у газобетона и ниже, чем у обычного бетона [41].

Авторы исследования [42] изучали гранулы зольного гравия, полученные с помощью смешения золы уноса на лопастной мешалке с последующим гранулированием с помощью гранулятора и спеканием в системе Дуайт-Ллойда. Клинкер на основе золы, использовался отчасти как мелкий заполнитель. В работе показаны свойства конструкционного легкого бетона, содержащего эти типы заполнителей [42].

В исследовательской работе [43] рассматривают использование ценосферы золы уноса и обжигового искусственного гравия в качестве заменителей натурального мелкозернистого заполнителя и натурального крупнозернистого заполнителя для конструкционного легкого бетона. Всего было подготовлено шестнадцать бетонных смесей с заменой как натурального мелкозернистого заполнителя, так и натурального крупнозернистого заполнителя на ценосферы золы уноса и обжиговый искусственный гравий, соответственно, с различными комбинациями (0 %, 50 %, 75 % и 100 % каждая). Измерялись удобоукладываемость, плотность и пластичность бетонных смесей, а также плотность, прочность на сжатие, прочность на растяжение при скалывании, прочность на изгиб, водопоглощение и объем пор. Проводилось также определение прочности бетона ультразвуковым методом и метод упругого отскока. Прочность на сжатие оказалась в пределах 19,35–32,04 МПа, а прочность на растяжение - 1,83–3,48. Плотность вышеуказанных смесей составила от 1226 кг/м³ до 2048 кг/м³ [43].

1.7 Применение фибры в бетонах с зольным гравием

В перечисленных выше статьях в ряде случаев в бетонной смеси использовалась стальная фибра [9], [13], [18], [19], [29], [36], [40], [44] пластиковая фибра [37], [45], а также сочетание этих двух фибр [37], [40].

1.8 Применение модификаторов и пластификаторов в бетонных смесях с зольным гравием

В перечисленных выше статьях в ряде случаев в бетонной смеси использовались различные добавки, такие как микрокремнезем [4], [19], [23], [24], [28], [41], нанокремнезем [9], суперпластификаторы [14], [28], [41].

1.9 Изученные основные параметры бетонной смеси и бетона с зольным гравием

Рассматривалась удобоукладываемость бетонной смеси в работах [1], [11], [14], [16], [21], [27], [41], [43].

Такие свойства бетонной смеси как расслаиваемость, водоотделение и раствороотделение в работах, представленных в обзоре, не были исследованы.

В таблице 1 приведены свойства бетона, которые рассмотрены в обзоре статей.

Таблица 1. Свойства бетона, рассмотренные в обзоре статей

Свойство бетона	Ссылка на статью
прочность бетона при сжатии	[2–4], [6], [7], [9–13], [15–17], [19–24], [26–35], [36–38], [40], [41], [43]
прочность бетона при растяжении	[7], [12], [13], [19], [22–24], [29], [32], [27], [36], [38], [40], [43]
прочность бетона на изгиб	[13], [24], [29], [30], [32], [36], [43]
морозостойкость	[2], [38]
водонепроницаемость	[2], [9], [28], [32]
жесткость	[2], [12], [13], [22], [23], [24], [29], [27], [36], [38], [40]
долговечность	[4], [33]
водопоглощение	[4], [11], [17], [43]
газопроницаемость	[4], [6], [9]
хлорид натрия	[4], [6], [32], [27], [38], [39]
коррозионная стойкость бетона	[4]
пористость	[17]
сцепление бетона с арматурой	[18], [19]
усадка бетона	[7], [20], [22], [23], [29], [33], [36], [41]
ползучесть	[22–24]

1.10 Выводы по результатам обзора, постановка задачи исследования

Обзор был выполнен по источникам, индексированным в международной базе данных Scopus и не включает в себя иные публикации, ряд из которых тоже может представлять интерес.

Результаты обзора показывают большую заинтересованность исследователей к бетонам с зольным гравием.

В ходе обширных исследований за последние годы были изучены основные свойства бетонов с зольным гравием для различных областей и их применение (легкие бетоны, высокопрочные бетоны, самоуплотняющиеся бетоны). Выявлено влияние добавок фибры, суперпластификаторов, микрокремнезема и нанокремнезема на характеристики бетонных смесей и бетонов. Получены математические модели, основанные на эмпирических данных в виде модифицированного уравнения Болоема и регрессионных зависимостей. Однако в рассмотренных работах не содержится строгой теории, описывающей формирование основных свойств таких бетонов в зависимости от расчетной формулы, позволяющей прогнозировать свойства в широком диапазоне изменяемых параметров матрицы и заполнителей бетона. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований.

Объектом дальнейшего исследования мы выбираем бетоны с безобжиговым зольным гравием из золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5 ОАО «СИБЭКО» в силу большого объема вырабатываемой золы уноса и отсутствия ее исследований. При этом полученные результаты будут обобщены на применение зол уноса других ТЭЦ страны.

Задачами работы является выяснение влияния безобжигового зольного гравия на удобоукладываемость и другие технологические параметры бетонной смеси и на характеристики бетонов, разработка рекомендаций по применению таких заполнителей и их внедрение.

2. Методы

Безобжиговый зольный гравий получен из золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5. Гравий имеет серый цвет, округлую форму и шероховатую поверхность (рис.2).

Испытания зольного гравия выполнены в лаборатории АО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденева» отдела «Технологии строительства и ремонта железобетонных сооружений».

В соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний» были проведены следующие испытания:

- определение насыпной плотности;
- определение водопоглощения крупного заполнителя;
- определение зернового состава;
- определение прочности заполнителя при сдавливании в цилиндре;
- определение морозостойкости крупного заполнителя испытанием в растворе сернокислого

натрия.

Метод определения прочности заполнителя на сжатие в цилиндре по ГОСТ 9758-2012 в целом соответствует методу определения прочности на сжатие в цилиндре по приложению С европейских норм EN 13055:2016 "Lightweight aggregates".

3. Результаты и обсуждение

Результаты испытаний безобжигового зольного гравия представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний безобжигового зольного гравия

Наименование показателя		Ед. из.	Результаты испытаний
Фракция		мм	5-15
Насыпная плотность		кг/м ³	970
Водопоглощение		%	6,1
Прочность заполнителя при сдавливании в цилиндре		МПа	6,2
Зерновой состав, остатки на ситах	20 мм	%	0
	15 мм		4,8
	12,5 мм		26,6
	10мм		29,7

	5 мм Меньше 5мм		37,2 1,7
Морозостойкость		-	Не менее F25

Размеры частиц 5-15 мм характерны для безобжигового зольного гравия и близки к размерам в работах [24], [28].

В соответствии с ГОСТ 32496-2013 “Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия” насыпной плотности 970 кг/м³ соответствует марка по плотности М1000, прочности зольного гравия при сдавливании в цилиндре 6,2 МПа соответствует марка по прочности П250.

В соответствии с европейскими нормами EN 13055:2016 “Lightweight aggregates” гранулы минерального происхождения имеют истинную плотность, не превышающую 2000 кг/м³, или насыпную плотность, не превышающую 1200 кг/м³. Следовательно изучаемый нами безобжиговый зольный гравий соответствует требованиям европейских норм, в качестве легкого крупного заполнителя для бетонов.

Водопоглощение зольного гравия, равное 6,1 %, существенно больше, чем водопоглощение у других типов традиционных заполнителей, кроме керамзитового гравия со значением 8-20 %.

По фракционному составу и прочности при сдавливании в цилиндре зольный гравий примерно соответствует заполнителю в работах [6–15], [16–24].

4. Заключение

Для выбора рациональных крупных заполнителей для широкого класса бетонов выполнен краткий обзор публикаций по данной теме. Исследованы характеристики безобжигового зольного гравия из золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

- Число публикаций по данной теме увеличивается начиная с 2002 года, отражая растущий интерес исследователей к данной теме. Наибольшее число публикаций сделано исследователями из Индии и Турции.

- Проанализированные в обзоре работы убедительно показывают возможность использования безобжигового зольного гравия для конструктивных бетонов. Накопленный объем экспериментальных данных не завершился построением строгой теории или получением расчетных зависимостей для широкого класса бетонов и заполнителей, позволяющих прогнозировать свойство бетонной смеси и бетонов. Имеющиеся попытки построения расчетных зависимостей носят характер построения аппроксимаций (регрессионных зависимостей) [12], [38] или уточнения коэффициентов для уравнения Боломея [26].

- Выполненные авторами экспериментальные исследования безобжигового зольного гравия показали водопоглощение крупного заполнителя 6,1 % и прочность заполнителя при сдавливании в цилиндре 6,2 МПа.

- Полученные характеристики заполнителей показывают их возможность использования в конструктивных бетонах с легким крупным заполнителем.

Литература

- [1]. Kumar, P.P., Rama Mohan Rao, P. Packing density of self compacting concrete using normal and lightweight aggregates. 2017. International Journal of Civil Engineering and Technology. 8 (4), pp. 1156–1166.
- [2]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. 2011. Construction and Building Materials. 25 (3), pp. 1430–1438. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.022
- [3]. Gomathi, P., Sivakumar, A. Accelerated curing effects on the mechanical performance of cold bonded and sintered fly ash aggregate concrete. 2015. Construction and Building Materials. 77 pp. 276–287. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.108
- [4]. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., Mermerdaş, K. Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates. 2013. Composites Part B: Engineering. 53 pp. 258–266. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.070
- [5]. Kirubakaran, D., Joseravindraraj, B. Utilization of pelletized fly ash aggregate to replace the natural aggregate: A review. 2018. International Journal of Civil

References

- [1]. Kumar, P.P., Rama Mohan Rao, P. Packing density of self compacting concrete using normal and lightweight aggregates. 2017. International Journal of Civil Engineering and Technology. 8 (4), pp. 1156–1166.
- [2]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. 2011. Construction and Building Materials. 25 (3), pp. 1430–1438. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.022
- [3]. Gomathi, P., Sivakumar, A. Accelerated curing effects on the mechanical performance of cold bonded and sintered fly ash aggregate concrete. 2015. Construction and Building Materials. 77 pp. 276–287. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.108
- [4]. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., Mermerdaş, K. Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates. 2013. Composites Part B: Engineering. 53 pp. 258–266. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.070
- [5]. Kirubakaran, D., Joseravindraraj, B. Utilization of pelletized fly ash aggregate to replace the natural aggregate: A review. 2018. International Journal of Civil Engineering and Technology. 9 (8), pp. 147–154.

- Engineering and Technology. 9 (8), pp. 147–154.
- [6]. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Ali, B., Mermerdaş, K. Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes. 2013. *Construction and Building Materials*. 49 pp. 417–424. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.042
 - [7]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. 2011. *Materials and Design*. 32 (4), pp. 2396–2403. doi:10.1016/j.matdes.2010.12.053
 - [8]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Properties of lightweight concretes made from lightweight fly ash aggregates. 2009. *Excellence in Concrete Construction through Innovation - Proceedings of the International Conference on Concrete Construction*. pp. 251–261.
 - [9]. Their, J.M., Özakça, M. Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. 2018. *Construction and Building Materials*. 180 pp. 12–22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.274
 - [10]. Narattha, C., Chaipanich, A. Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates. 2018. *Journal of Cleaner Production*. 171 pp. 1094–1100. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.259
 - [11]. Venkata Suresh, G., Pavan Kumar Reddy, P., Karthikeyan, J. Effect of GGBS and Fly ash aggregates on properties of geopolymer concrete. 2016. *Journal of Structural Engineering (India)*. 43 (5), pp. 436–444.
 - [12]. Thomas, J., Harilal, B. Mechanical properties of cold bonded quarry dust aggregate concrete subjected to elevated temperature. 2016. *Construction and Building Materials*. 125 pp. 724–730. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.093
 - [13]. Güneyisi, E., Gesoglu, M., Özturan, T., Ipek, S. Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber. 2015. *Construction and Building Materials*. 84 pp. 156–168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.054
 - [14]. Gesoglu, M., Güneyisi, E., Ozturan, T., Oz, H.O., Asaad, D.S. Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates. 2015. *Construction and Building Materials*. 79 pp. 40–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.012
 - [15]. Gopi, R., Revathi, V., Kanagaraj, D. Light expanded clay aggregate and fly ash aggregate as self curing agents in self compacting concrete. 2015. *Asian Journal of Civil Engineering*. 16 (7), pp. 1025–1035.
 - [16]. Gomathi, P., Sivakumar, A. Synthesis of geopolymer based class-F fly ash aggregates and its composite properties in Concrete. 2014. *Archives of Civil Engineering*. 60 (1), pp. 55–75. doi:10.2478/ace-2014-0003
 - [17]. Al Bakri, A.M.M., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, I.K., Rafiza, A.R., Zarina, Y. Comparison of geopolymer fly ash and ordinary portland cement to the strength of concrete. 2013. *Advanced Science Letters*. 19 (12), pp. 3592–3595. doi:10.1166/asl.2013.5187
 - [18]. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Ipek, S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes. 2013. *Construction and Building Materials*. 47 pp. 358–365. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.059
 - [19]. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzeebaree, R., Mermerdaş, K. Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates. 2013. *Construction and Building Materials*. 40 pp. 982–990. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.074
 - [6]. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Ali, B., Mermerdaş, K. Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes. 2013. *Construction and Building Materials*. 49 pp. 417–424. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.042
 - [7]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. 2011. *Materials and Design*. 32 (4), pp. 2396–2403. doi:10.1016/j.matdes.2010.12.053
 - [8]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Properties of lightweight concretes made from lightweight fly ash aggregates. 2009. *Excellence in Concrete Construction through Innovation - Proceedings of the International Conference on Concrete Construction*. pp. 251–261.
 - [9]. Their, J.M., Özakça, M. Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. 2018. *Construction and Building Materials*. 180 pp. 12–22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.274
 - [10]. Narattha, C., Chaipanich, A. Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates. 2018. *Journal of Cleaner Production*. 171 pp. 1094–1100. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.259
 - [11]. Venkata Suresh, G., Pavan Kumar Reddy, P., Karthikeyan, J. Effect of GGBS and Fly ash aggregates on properties of geopolymer concrete. 2016. *Journal of Structural Engineering (India)*. 43 (5), pp. 436–444.
 - [12]. Thomas, J., Harilal, B. Mechanical properties of cold bonded quarry dust aggregate concrete subjected to elevated temperature. 2016. *Construction and Building Materials*. 125 pp. 724–730. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.093
 - [13]. Güneyisi, E., Gesoglu, M., Özturan, T., Ipek, S. Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber. 2015. *Construction and Building Materials*. 84 pp. 156–168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.054
 - [14]. Gesoglu, M., Güneyisi, E., Ozturan, T., Oz, H.O., Asaad, D.S. Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates. 2015. *Construction and Building Materials*. 79 pp. 40–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.012
 - [15]. Gopi, R., Revathi, V., Kanagaraj, D. Light expanded clay aggregate and fly ash aggregate as self curing agents in self compacting concrete. 2015. *Asian Journal of Civil Engineering*. 16 (7), pp. 1025–1035.
 - [16]. Gomathi, P., Sivakumar, A. Synthesis of geopolymer based class-F fly ash aggregates and its composite properties in Concrete. 2014. *Archives of Civil Engineering*. 60 (1), pp. 55–75. doi:10.2478/ace-2014-0003
 - [17]. Al Bakri, A.M.M., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, I.K., Rafiza, A.R., Zarina, Y. Comparison of geopolymer fly ash and ordinary portland cement to the strength of concrete. 2013. *Advanced Science Letters*. 19 (12), pp. 3592–3595. doi:10.1166/asl.2013.5187
 - [18]. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Ipek, S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes. 2013. *Construction and Building Materials*. 47 pp. 358–365. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.059
 - [19]. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzeebaree, R., Mermerdaş, K. Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates. 2013. *Construction and Building Materials*. 40 pp. 982–990. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.074
 - [20]. Priyadharshini, P., Mohan Ganesh, G., Santhi, A.S. Effect of cold bonded fly ash aggregates on strength & restrained shrinkage properties of concrete. 2012. *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012*. pp. 160–164.
 - [21]. Joseph, G., Ramamurthy, K. Workability and strength behaviour of concrete with cold-bonded fly ash aggregate. 2009. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 42 (2), pp. 151–160. doi:10.1617/s11527-008-9374-x
 - [22]. Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight

- [20]. Priyadharshini, P., Mohan Ganesh, G., Santhi, A.S. Effect of cold bonded fly ash aggregates on strength & restrained shrinkage properties of concrete. 2012. IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012. pp. 160–164.
- [21]. Joseph, G., Ramamurthy, K. Workability and strength behaviour of concrete with cold-bonded fly ash aggregate. 2009. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 42 (2), pp. 151–160. doi:10.1617/s11527-008-9374-x
- [22]. Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. 2006. *Cement and Concrete Composites*. 28 (7), pp. 598–605. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.04.002
- [23]. Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E. Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates. 2004. *Cement and Concrete Research*. 34 (7), pp. 1121–1130. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.024
- [24]. Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E. Effect of coarse aggregate properties on the ductility of lightweight concretes. 2003. *Role of Cement Science in Sustainable Development - Proceedings of the International Symposium - Celebrating Concrete: People and Practice*. pp. 537–546.
- [25]. Shivaprasad, K.N., Das, B.B. Effect of Duration of Heat Curing on the Artificially Produced Fly Ash Aggregates. 2018. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 431 (9), . doi:10.1088/1757-899X/431/9/092013
- [26]. Rajamane, N.P., Ambily, P.S. Modified Bolomey equation for strengths of lightweight concretes containing fly ash aggregates. 2012. *Magazine of Concrete Research*. 64 (4), pp. 285–293. doi:10.1680/mac.11.00157
- [27]. Dinakar, P. Properties of fly-ash lightweight aggregate concretes. 2013. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 166 (3), pp. 133–140. doi:10.1680/coma.11.00046
- [28]. Dash, S., Kar, B., Mukherjee, P.S. Pervious concrete using fly ash aggregate as coarse aggregate-an experimental study. 2018. *AIP Conference Proceedings*. 1953 . doi:10.1063/1.5032808
- [29]. Babu, B.R., Thenmozhi, R. An investigation of the mechanical properties of Sintered Fly Ash Lightweight Aggregate Concrete (SFLWAC) with steel fibers. 2018. *Archives of Civil Engineering*. 64 (1), pp. 73–85. doi:10.2478/ace-2018-0005
- [30]. Bursa, C., Tanriverdi, M., Çiçek, T. Use of fly ash aggregates in production of light-weight concrete. 2017. *IMCET 2017: New Trends in Mining - Proceedings of 25th International Mining Congress of Turkey*. pp. 469–476.
- [31]. Wasserman, R., Bentur, A. Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes. 1997. *Cement and Concrete Research*. 27 (4), pp. 525–537. doi:10.1016/S0008-8846(97)00019-7
- [32]. Cerny, V., Kocianova, M., Drochytka, R. Possibilities of Lightweight High Strength Concrete Production from Sintered Fly Ash Aggregate. 2017. *Procedia Engineering*. 195 pp. 9–16. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.517
- [33]. Kayali, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. 2008. *Construction and Building Materials*. 22 (12), pp. 2393–2399. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.09.001
- [34]. Domagala, L. The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete. 2015. *Procedia Engineering*. 108 pp. 206–213. doi:10.1016/j.proeng.2015.06.139
- [35]. Černý, V., Sokol, P., Drochytka, R. Production possibilities of concrete based on artificial fly ash aggregates. 2014. *Advanced Materials Research*. 923 pp. 130–133. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.923.130
- [36]. Domagala, L. Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. 2011. *Journal of Civil Engineering and Management*. 17 (1), pp. 36–44. doi:10.3846/13923730.2011.553923
- [37]. Harish, K.V., Dattatreya, J.K., Neelamegam, M. Properties of sintered fly ash aggregate concrete with and without fibre and latex. 2011. *Indian Concrete Journal*. 85 (1), pp. 35–42.
- [38]. Kockal, N.U., Özturan, T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. 2010. *Journal of Hazardous Materials*. 179 (1–3), pp. 954–965. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.098
- [39]. Kayali, O., Zhu, B. Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete. 2005. *Construction and Building Materials*. 19 (4), pp. 327–336.

- of concrete based on artificial fly ash aggregates. 2014. *Advanced Materials Research*. 923 pp. 130–133. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.923.130
- [36]. Domagala, L. Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. 2011. *Journal of Civil Engineering and Management*. 17 (1), pp. 36–44. doi:10.3846/13923730.2011.553923
- [37]. Harish, K.V., Dattatreya, J.K., Neelamegam, M. Properties of sintered fly ash aggregate concrete with and without fibre and latex. 2011. *Indian Concrete Journal*. 85 (1), pp. 35–42.
- [38]. Kockal, N.U., Ozturan, T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. 2010. *Journal of Hazardous Materials*. 179 (1–3), pp. 954–965. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.098
- [39]. Kayali, O., Zhu, B. Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete. 2005. *Construction and Building Materials*. 19 (4), pp. 327–336. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.07.003
- [40]. Kayali, O., Haque, M.N., Zhu, B. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. 2003. *Cement and Concrete Composites*. 25 (2), pp. 207–213. doi:10.1016/S0958-9465(02)00016-1
- [41]. Nair, H.K., Ramamurthy, K. Behaviour of concrete with sintered fly ash aggregate. 2010. *Indian Concrete Journal*. 84 (6), pp. 33–38.
- [42]. Kikuchi, M., Mukai, T. PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHT-WEIGHT CONCRETE CONTAINING SINTERED FLY ASH AGGREGATE AND CLINKER ASH. 1986. *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 8 pp. 45–50.
- [43]. Satpathy, H.P., Patel, S.K., Nayak, A.N. Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate. 2019. *Construction and Building Materials*. 202 pp. 636–655. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034
- [44]. Klyuev, S.V., Klyuev, A.V., Khezhev, T.A., Pukharenko, Y.
- [45]. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber
- [46]. (2018) *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, pp. 6407-6412.
- [47]. Lesovik, R.V., Klyuyev, S.V., Klyuyev, A.V., Netrobenko, A.V., Yerofeyev, V.T., Durachenko, A.V. Fine-grain concrete reinforced by polypropylene fiber (2015) *Research Journal of Applied Sciences*, 10 (10), pp. 624-628.

Контактная информация

- 1.* +79062557360, plml@mail.ru (Усанова Ксения Юрьевна, ассистент)
2. +7(812)5341286, ugb@mail.ru (Барабанщиков Юрий Германович, д.т.н., профессор)
3. +79110197668, Fedorenkoyp@vniig.ru (Федоренко Юлия Петровна, заведующая лабораторией)
4. +79213502610, kostyryasa@vniig.ru (Костыря Сергей Александрович, руководитель проекта)

Contact information

- 1.* +79062557360, plml@mail.ru (Usanova Kseniya)
2. +7(812)5341286, ugb@mail.ru (Barabanshchikov Yurii, Ph.D., Professor)
3. +79110197668, Fedorenkoyp@vniig.ru (Fedorenko, Yuliya)
4. +79213502610, kostyryasa@vniig.ru (Kostyrya Sergey)

© Усанова К.Ю., Барабанщиков Ю.Г., Федоренко Ю.П., Костыря С.А. 2018