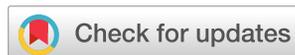


Научная статья
УДК 691.54
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>
EDN: NYKJTH



КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО

А. В. Явинский*, И. Л. Чулкова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
г. Омск, Россия

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

le5@inbox.ru, 0000-0002-2378-3947

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Хранение золы гидроудаления на золоотвалах негативно сказывается на экологической ситуации в близлежащих населенных пунктах, отвалы постоянно пылят и загрязняют источники воды. Для решения данной проблемы предлагается использовать золу гидроудаления в качестве компонента смешанного вяжущего. Поскольку удельная поверхность золы гидроудаления различна на всей территории отвала, необходимо изучить её влияние на набор прочности смешанного вяжущего при различных условиях твердения.

Материалы и методы. Перечислено оборудование, на котором выполнялся эксперимент. Для определения удельной поверхности использовался прибор ПСХ-12, сушка золы осуществлялась в сушильном шкафу. Хранение образцов проводилось в камере нормального твердения. Представлен химический состав золы гидроудаления с ТЭЦ-5 г. Омска.

Результаты. Приведены экспериментальные данные о прочности образцов смешанного вяжущего в возрасте 1, 3, 7, 14, 21, 28, 90 сут нормального твердения и данные о прочности образцов, прошедших тепловлажностную обработку. Прочность материала смешанного вяжущего с удельной поверхностью золы гидроудаления 460–490 м²/кг при нормальных условиях твердения составляет 42,57 МПа, что не уступает контрольному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после тепловлажностной обработки наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Образцы, в которые вводилась зола гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370, 650–700 м²/кг, показывают результаты по прочности ниже, чем контрольный беззолый образец независимо от условий твердения.

Обсуждение и заключение. Обосновано, что рациональным является использование золы гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг. Его прочность при нормальных условиях твердения составляет 42,57 МПа, что не уступает контрольному беззолному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после тепловлажностной обработки наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Повышение прочности образцов из смешанного вяжущего связано с ускорением в них прохождения пуццолановой реакции, продукты которой положительно влияют на прочность получаемых изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цемент, зола гидроудаления, смешанное вяжущее, прочность, экология, строительство, удельная поверхность

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 08.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Явинский А. В., Чулкова И. Л. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 158–166. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>

© Явинский А. В., Чулкова И. Л., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>
EDN: NYKJTH

KINETICS OF MIXED BINDER STRENGTH GAIN

Aleksander V. Yavinsky*, Irina L. Chulkova

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

le5@inbox.ru, 0000-0002-2378-3947

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The storage of pond ash at ash dumps has a negative impact on the environmental situation in the nearby settlements, dumps constantly dust and pollute water sources. To solve this problem, it is proposed to use ash from pond ash as a component of mixed binder. Since the specific surface area of pond ash is different throughout the dump, it is necessary to study its influence on the strength set of mixed binder under different curing conditions.

Materials and methods. The equipment on which the experiment was carried out is listed. To determine the specific surface ПСХ-12 device was used, ash drying was carried out in a desiccator. The samples were stored in a normal solidification chamber. The chemical composition of pond ash from TPP-5 of Omsk was presented.

Results. Experimental data on the strength of samples of mixed binder at the age of 1,3,7,14,21,28,90 days of normal hardening and data on the strength of samples after heat and humidity treatment are presented. Durability of mixed binder composition with specific surface of hydraulic ash of 460-490 m²/kg under normal hardening conditions amounts to 42.57 MPa which corresponds to natural strength. The composition with the use of pond ash 460-490 m²/kg after water removal increased strength by 12% in comparison with the control composition. Compositions with specific surface of wet pond ash 220-250, 340-370, 650-700 m²/kg show durability results lower than the control ashless composition irrespective of hardening conditions.

Discussion and conclusions. It is proved that the use of pond ash with a specific surface of 460-490 m²/kg is rational. Its strength under normal conditions of hardening is 42,57 MPa, which corresponds to the strength of the concrete. The composition with the use of wet pond ash 460-490 m²/kg after heat and moisture treatment has an increase in strength by 12% compared to the control composition. Increased strength of mixed binder compositions is associated with acceleration of pozzolanic reaction in them, the products of which have a positive effect on the strength of the products.

KEYWORDS: cement, pond ash, mixed binder, strength, construction, ecology, specific surface area

The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Yavinsky A. V., Chulkova I. L. Kinetics of mixed binder strength gain. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>

© Yavinsky A. V., Chulkova I. L., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все чаще поднимается вопрос о переработке отходов тепловых электростанций (ТЭЦ). Хранение отходов ТЭЦ на золоотвалах негативно влияет на экологическую обстановку на близлежащих территориях [1, 2]. Схема воздействия отходов ТЭЦ на окружающую среду представлена на рисунке 1. Мировая практика демонстрирует богатый опыт в переработке техногенных отходов ТЭЦ в сухом виде [3, 4]. Многие ученые из Китая, Индии исследовали использование отходов ТЭЦ в качестве компонента бетона [5, 6, 7]. Большой вклад внесли и отечественные авторы, которые занимались исследованиями в области переработки отходов в строительной отрасли [8, 9, 10]. В представленных ра-

ботах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] используют золу уноса или предварительно высушенную золу гидроудаления. Сушка золы гидроудаления представляет собой энергозатратную операцию, вследствие чего стоимость сырья повышается. Использование золы гидроудаления в состоянии естественной влажности позволит снизить ее стоимость, а следовательно, и стоимость изделий, в которых она применяется.

Также для России и, в частности, Западной Сибири, важной проблемой является строительство качественного и долговечного дорожного покрытия. Покрытия из асфальта не отличаются долговечностью и морозостойкостью [11], вследствие чего из бюджета страны ежегодно направляются большие суммы на ремонт и строительство дорог, в 2022 г. было выделено 331,7 млрд руб.

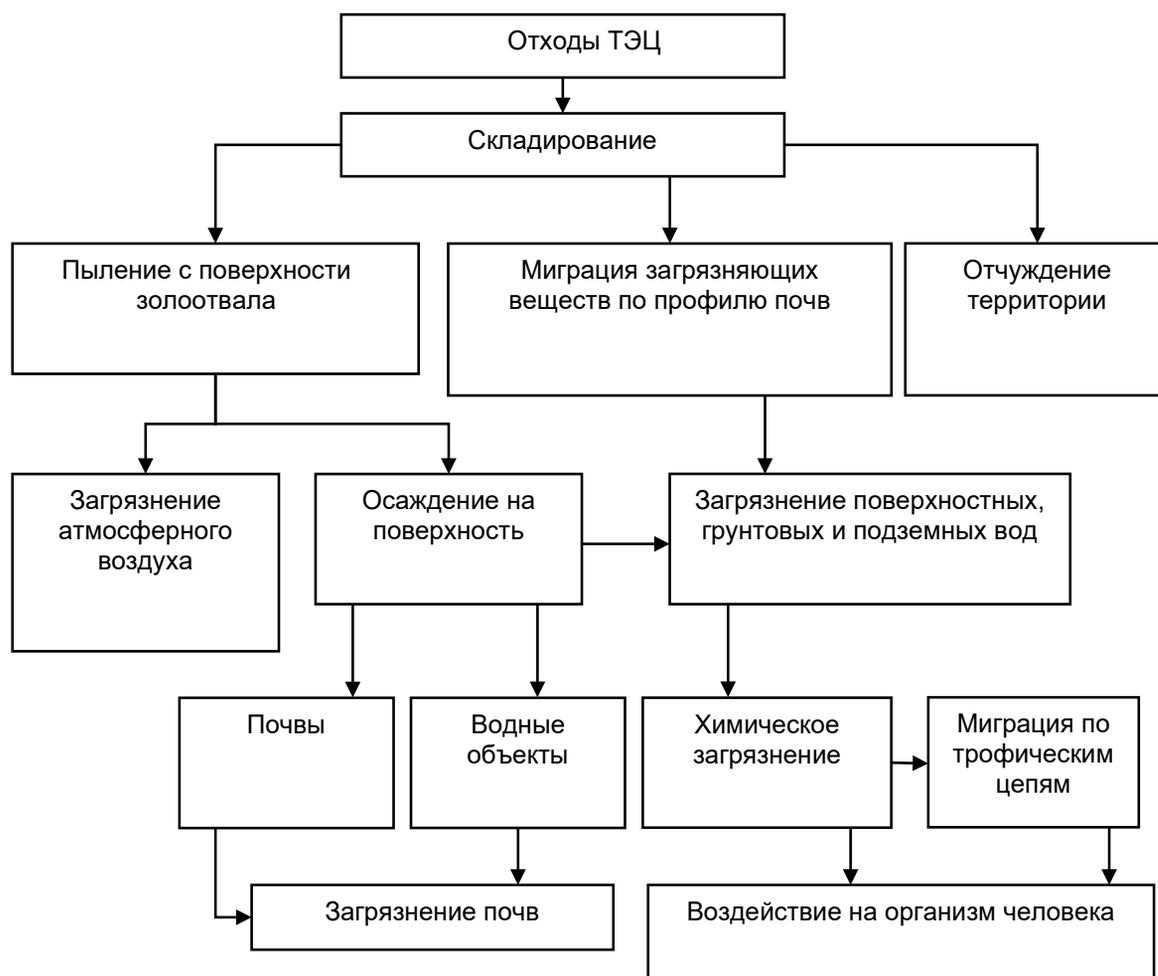


Рисунок 1 – Схема воздействия отходов ТЭЦ на окружающую среду
 Источник: составлено авторами.
 Figure 1 – Scheme of the environmental impact of TPP waste
 Source: compiled by the authors.

Дорожное покрытие из бетона обладает рядом преимуществ перед асфальтом, например, повышенной прочностью и морозостойкостью, но вследствие высоких затрат на строительство не пользуется популярностью в нашей стране [12]. Также важно отметить, что по асфальтовому покрытию можно ездить сразу после укладки, а цементобетонному необходимо время, чтобы набрать прочность.

Замене цемента и песка в бетонной смеси на золу гидроудаления посвящены работы [13, 14, 15, 16, 17, 18], однако их авторы делают акценты на химическом составе отходов ТЭЦ, а не на их удельной поверхности.

Использование золы гидроудаления во влажном виде в составе тяжелого бетона может позволить снизить его стоимость, а также улучшить экологическую обстановку в России.

Целью работы является исследование набора прочности смешанного вяжущего с заменой части цемента золой гидроудаления при различной удельной поверхности золы гидроудаления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения кинетики твердения смешанного вяжущего были запроектированы 5 составов, которые отличались удельной поверхностью золы гидроудаления, а также контрольный беззолый образец. Рациональное количество вводимой золы гидроудаления было установлено в ранее проводимых исследованиях и составляет 20% от массы цемента¹. Зола гидроудаления применялась в состоянии естественной влажности, влажность находилась высушиванием до постоянной массы и составила 42%. Удельная поверхность золы гидроудаления определялась прибором ПСХ-12, после ее высушивания до постоянной массы. Составы представлены в таблице 2.

В работе использовалась зола гидроудаления с ТЭЦ-5 г. Омска, точки отбора представлены на рисунке 2. Отбор образцов золы гидроудаления проводился из 4 точек с помощью мобильной буровой установки.



Рисунок 2 – Точки отбора золы гидроудаления с отвала ТЭЦ-5
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Ash extraction points from the ash dump of TPP-5
Source: compiled by the authors.

¹ Явинский А. В., Чулкова И. Л., Кацарский Р. С. Исследование водонепроницаемости и морозостойкости тяжелого бетона с золой гидроудаления для дорожного покрытия // Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. 2022. С. 514–517.

Таблица 1
Химический состав золы гидроудаления
Источник: составлено авторами.

Table 1
Chemical composition of pond ash
Source: compiled by the authors.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП*
57,83	1,11	23,29	7,26	0,13	0,78	1,66	0,50	0,69	0,42	6,33

* ППП – потери при прокаливании.

Таблица 2
Кинетика набора прочности образцов
Источник: составлено авторами.

Table 2
Kinetics of specimen strength gain
Source: compiled by the authors.

№ состава	Золо-цементное отношение, %	S _{уд} золы гидроудаления, м ² /кг	Водовязущее отношение %	Прочность на сжатие R _{сж} , МПа							
				Время твердения образцов, сут							После ТВО
				1	3	7	14	21	28	90	
1	0:100	-	29	4,00	12,54	23,25	30,58	39,01	43,22	54,33	35,46
2	20:80	220–250	32	3,08	9,84	20,04	27,06	34,05	37,12	59,23	33,85
3	20:80	340–370	32	3,60	11,04	21,06	28,10	35,92	39,80	61,37	35,07
4	20:80	460–490	32	3,78	12,22	23,12	29,82	37,32	42,57	65,41	36,35
5	20:80	650–700	32	3,17	9,97	20,50	27,15	34,41	38,10	62,11	33,43

В составах 2, 3, 4 применялась зола гидроудаления в естественном состоянии с различных точек отвала. Для достижения удельной поверхности 650–700 м²/кг зола гидроудаления подвергалась помолу в мельнице. Помол золы гидроудаления проводился в планетарной мельнице. Зола гидроудаления подвигалась помолу в высушенном состоянии.

Химический состав определялся с помощью рентгенофлуоресцентного метода и представлен в таблице 1.

По химическому составу золы гидроудаления можно сделать вывод, что она не обладает собственной активностью и является ультракислой (модуль основности <1). Модуль основности M_о -представляет отношение сумм основных оксидов к кислотным оксидам:

$$M_o = \frac{CaO+MgO+K_2O+Na_2O}{SiO_2+Al_2O_3} \quad (1)$$

Потери при прокаливании составили более 6%, что может быть следствием спекания угольного топлива, из-за чего в золе может находиться много крупных частиц несгоревшего топлива, что может негативно сказаться на ранних сроках твердения. Также негативное

влияние может оказывать неоднородность золы гидроудаления [19].

Для изготовления тяжелого бетона использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, который был исследован в лаборатории СибАДИ и показал соответствие всем требованиям ГОСТ 31108–2020. Удельная поверхность цемента определялась на приборе ПСХ-12 и составила 310 м²/кг.

Из смешанного вяжущего изготавливались образцы – кубики с ребром 2 см, которые твердели в камере нормального твердения (при температуре 20 °С ± 2). Часть образцов подверглась тепловлажностной обработке (ТВО) в пропарочной камере. Режим ТВО составил 4 ч, подъем температуры – 6 ч, изотермической выдержки при температуре 60 °С и 4 ч плавного остывания. Для пропаривания образцов использовалась камера нормального твердения. Режим тепловлажностной обработки изделий выбирался исходя из ГОСТ 33148–2014, так как запроектированные составы планируется использовать при производстве дорожных плит.

Прочность при сжатии образцов определяли на универсальной испытательной машине серии UGT-AI-7000LA в возрасте 1,3, 7,14, 21, 28 сут. У образцов, прошедших ТВО, прочность определялась после их изъятия из пропарочной камеры через сутки после остывания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 2 представлены результаты исследования на прочность при сжатии образцов кубиков в нормальных условиях твердения, а также после ТВО.

Проанализировав результаты, представленные в таблице № 2, можно сделать следующие выводы. В первые сутки образцы с золой гидроудаления характеризуются снижением прочности по сравнению с контрольным беззолым образцом. Наиболее заметен данный эффект при удельной поверхности золы 220–250 м²/кг (образец № 2), снижение прочности составляет 23%. Это может быть следствием микропористости золы и наличия в ней агрегированных частиц, которые не позволяют полноценно прогидратировать портландцементу. Поскольку зола гидроудаления использовалась в состоянии естественной влажности, то часть воды осталась в её микропорах, не прореагировав с портландцементом.

У образцов № 2 наблюдается наибольшее снижение прочности по сравнению с контрольным беззолым образцом в любом возрасте, что является следствием повышенной водопотребности смешанного вяжущего вследствие пористой структуры золы гидроудаления. Стоит заметить, что скорость набора прочности у данного образца меньше, чем у остальных образцов с золой гидроудаления при любом сроке твердения. Так, в возрасте 28 сут прочность образца на 15% меньше, чем у контрольного образца. Из чего можно сделать вывод, что применение золы с удельной поверхностью 220–250 м²/кг при нормальных условиях твердения не является рациональным.

Образец № 3, в котором использовалась зола гидроудаления с удельной поверхностью 340–370 м²/кг, показывает результаты на прочность при сжатии лучше, чем образца № 2, хотя и уступает контрольному образцу. Так, у образца № 3 прочность в 1 сут твердения значительно выше, чем у образца № 2 (больше на 15%), но все еще ниже, чем у контрольного образца (ниже на 10%). Однако к более поздним срокам твердения прочность образцов № 3 соизмерима с образцами № 2. Например, в возрасте 7 сут у образца № 3 прочность при сжатии выше, чем у образца № 2 всего на 5%. По сравнению с контрольным образцом № 1 у образца № 3 заметно снижение прочности

на ~10% на всех этапах твердения. Снижение прочности также может быть негативным эффектом золы гидроудаления вследствие наличия в ней частиц несгоревшего топлива, хотя и меньшем, чем в образце № 2.

По показателям образцов № 4 можно сказать, что применение золы гидроудаления в составе смешанного вяжущего с удельной поверхностью 460–490 м²/кг является наиболее рациональным, поскольку образцы № 4 имеют значения прочности лучше, чем у остальных золных образцов в любом возрасте. Так, в возрасте 3 сут образец № 4 имеет прочность всего на 3% ниже, чем у контрольного образца. Повышение прочности у образца № 4 при сравнении с другими образцами смешанного вяжущего может быть следствием микронаполняющего эффекта золы гидроудаления. Также, поскольку при повышении удельной поверхности золы гидроудаления в ней наблюдается повышение содержания гладких частиц шарообразной формы, может наблюдаться «шарикоподшипниковый эффект»², вследствие чего улучшается скольжение частиц цемента по поверхности золных частиц.

Образец № 5, в котором использовалась молотая зола гидроудаления с удельной поверхностью 650–700 м²/кг показал значения по прочности ниже, чем образцы № 3 и № 4, а также значительно ниже контрольного образца. Прочность образцов № 5 в возрасте 1 и 3 сут ниже, чем у контрольного образца на 21 и 20% соответственно. Повышение удельной поверхности золы гидроудаления до значений 650–700 м²/кг вызывает слипание частиц при помоле вследствие воздействия на них поверхностных сил.

Поскольку удельная поверхность золы значительно выше, чем у цемента, частицы золы агрегируются на частицах цемента и препятствуют ему полноценно вступить в реакцию с водой.

После 90 сут твердения все составы с золой гидроудаления показывают прочность выше, чем контрольный беззолый состав. Например, состав № 4 показывает прочность на 17% выше, чем контрольный беззолый образец. Состав № 2, который на 28 сут показывал наименьшую прочность из испытываемых образцов, имеет прочность на 9% выше, чем состав № 1. Повышение прочности образцов, содержащих золу гидроудаления, является следствием пуццоланового эффекта золы.

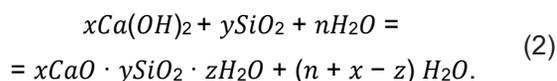
² Безродных А. А., Строкова В. В. Теоретическое обоснование использования модифицированных вяжущих для укрепления грунтов // V Международный студенческий строительный форум–2020. 2020. 126–131.

Снизить негативное влияние золы гидроудаления на набор прочности смешанного вяжущего можно использованием пластифицирующих добавок, что будет в дальнейшем изучаться.

Важно заметить, что зола гидроудаления не обладает собственными вяжущими свойствами, но при взаимодействии с цементом она вступает в пуццолановую реакцию, результатом которой становится образование гидросиликатов кальция. Гидросиликаты кальция характеризуются повышенной прочностью и нерастворимостью, что положительно сказывается на прочности всех образцов с золой гидроудаления. Однако на начальных этапах твердения вяжущего данный эффект незначителен, проявляется при более поздних сроках твердения [20,21,22]. Ускорить протекание пуццолановой реакции можно с помощью ТВО [23].

Термоактивация пуццолановой реакции способна повысить прочность образцов с золой по сравнению с контрольным беззолным образцом. Так, образцы № 2 и № 3 после прохождения ТВО не уступают по прочности контрольному беззолному образцу, а также их прочность удовлетворяет требованиям ГОСТа (прочность после ТВО > 70% марочной прочности). У образца № 4 наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом.

Повышение прочности золных образцов после ТВО относительно контрольного образца по сравнению с образцами, твердевшими в камере нормального твердения, позволяет сделать вывод, что термоактивация пуццолановой реакции золы гидроудаления позволяет добиться прироста прочности образцов. В ходе пуццолановой реакции аморфный кремнезем, содержащийся в золе гидроудаления, взаимодействует с гидроксидом кальция, что приводит к образованию гидросиликатов кальция:



Данные новообразования благоприятно влияют на качество вяжущего, так как они повышают прочность и уменьшают пористость. Образование гидросиликатов кальция благоприятно влияет на долговечность золоцементных изделий [24, 25].

По результатам испытаний образцов, твердеющих в нормальных условиях и подвергшихся ТВО, можно сделать вывод, что помол золы гидроудаления до удельной поверхности

более 490 м²/кг является нецелесообразным, так как при повышении удельной поверхности наблюдается снижение прочности смешанного вяжущего. В составе смешанного вяжущего рекомендуется применять золу гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг, так как образцы с ней показали наибольшую прочность по сравнению с остальными.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение испытаний смешанного вяжущего с заменой 20% цемента на ультракислую золу гидроудаления позволило установить влияние удельной поверхности золы гидроудаления на кинетику набора прочности. Установлено, что применение золы гидроудаления с удельной поверхностью 220–250 м²/кг и 650–700 м²/кг негативно влияет на ранний набор прочности смешанного вяжущего (в 1 и 3 сут). Установлено, что образцы, в которых применялась зола гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370, 650–700 м²/кг не достигают прочности контрольного беззолного образца в возрасте 28 сут.

Установлено, что рациональным является использование золы гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг. Образец с данной удельной поверхностью золы гидроудаления продемонстрировал показатели по прочности, наиболее близкие к контрольному беззолному образцу в любые сроки твердения, а также соответствует марочной прочности в возрасте 28 сут.

Подтверждено, что ТВО оказывает благоприятное влияние на прочность при сжатии смешанного вяжущего с золой гидроудаления. Образцы с использованием золы гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370 м²/кг показали прочность, незначительно уступающую контрольному беззолному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после ТВО наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Повышение прочности образцов из смешанного вяжущего связано с ускорением в них прохождения пуццолановой реакции, продукты которой положительно влияют на прочность получаемых изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федюк Р. С., Смоляков А. К., Тимохин Р. А. Применение золошлаковых отходов в строительстве как фактор улучшения экологической обстановки // Экологический сборник 6: труды молодых ученых Поволжья. 2017. С. 391–395.

2. Yadav S., Pandey V. C., Singh L. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities // *Land Degradation & Development*. 2021. T. 32. № 16. С. 4453–4471.
3. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete // *SN Applied Sciences*. 2020. T. 2. № 6. – pp. 1-9.
4. Насруллоев Ф. Х., Кобулиев З. В., Тагоев С. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов душанбинской ТЭЦ-2 // *Химия и инженерная экология-XX*. 2020. С. 128–131.
5. Sowjanya S., Adishesu S. Statistical analysis of the physical properties of ternary blended concrete // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022. T. 7. № 1. pp. 1-9.
6. Divitkumar R. P. et al. Rheology of Sustainable Self Compacting Concrete with Triple Blend Cementitious Materials // *International Conference on Structural Engineering and Construction Management*. Springer, Cham, 2021. p. 905-919.
7. Khan R. A., Ganesh A. The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete // *Journal of building materials and structures*. 2016. T. 3. № 1. – p. 31
8. Баженов Ю. М. Эффективные бетоны для строительных и восстановительных работ с использованием бетонного лома и отвалных зол ТЭС / Ю. М. Баженов, С. А. Ю. Муртазаев // *Вестник МГСУ*. 2008. № 3. С. 124–127.
9. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Ковалева И. А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // *Вестник МГСУ*. Москва. 2015. № 11. С. 101–109.
10. Федюк Р. С., Мочалов А. В., Пезин Д. Н., Тимохин Р. А. Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства // *Вестник СибАДИ*. 2018. T. 15, № 2 (60). С. 294–304.
11. Шейнин А. М., Эккель С. В. Причина долговечности // *Строительная техника и технологии*. 2004. №1(29). С. 62–65
12. Салимова Б. Д., Худайкулов Р. М. Цементобетонные смеси в строительстве автомобильных дорог // *Вестник науки и образования*. 2020. № 3-3 (81). С. 9–11.
13. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete // *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019. T. 7. № 3. p. 12-20.
14. 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. T. 270. С. 121857.
15. Yousuf A. et al. Fly ash: production and utilization in India-an overview // *J Mater Environ Sci*. 2020. T. 11. № 6. pp. 911-921.
16. Jose A. et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 263. pp. 120136.
17. Lal D., Chatterjee A., Dwivedi A. Investigation of properties of cement mortar incorporating pond ash—an environmental sustainable material // *Construction and Building Materials*. 2019. T. 209. pp. 20-31.
18. Lee J. S. et al. A Study on the Possibility of Using Cement Raw Material through Chemical Composition Analysis of Pond Ash // *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2020. T. 24. № 6. pp. 180-188.
19. Махмудов А. М., Трофимов Б. Я., Гафоров Ф. А. Влияние количества и дисперсности золы на формирование структуры и свойства цементного камня // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. T. 21, № 4. С. 40–47.
20. Joshi R.C. Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization // *Indian Geotechnical Conference*. 2010. P. 16–18.
21. Коровкин М. О., Петухов А. В. Высокопрочные бетоны с высоким содержанием золы Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 1. С. 106–112.
22. Siddique R., Khan M. I. Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media, 2011.
23. Zhang Y., Sun Q., Yang X. Changes in color and thermal properties of fly ash cement mortar after heat treatment // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 165. С. 72-81.
24. Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 3. С. 16–24
25. Murtazaiev S. A.Y., Saidumov M. S., Lesovik V. S., Chernysheva N. V., Bataiev D. K. S. Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration for carbonation // *Modern Applied Science*. 2015. T. 9. № 4. pp. 233–245.

REFERENCES

1. Fedyuk R. S., Smolyakov A. K., Timohin R. A. Primenenie zoloshlakovyh othodov v stroitel'stve kak faktor uluchsheniya ekologicheskoy obstanovki [Application of ash and slag waste in construction as a factor in improving the environmental situation]. *Jekologicheskij sbornik 6: trudy molodyh uchenyh Povolzh'ja*. 2017: 391-395. (In Russ.)
2. Yadav S., Pandey V. C., Singh L. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities. *Land Degradation & Development*. 2021. Vol. 32. No 16: 4453-4471.
3. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete. *SN Applied Sciences*. 2020; Vol. 2. No 6: 1-9.
4. Nasrulloev F. Kh., Kobuliev Z. V., Tagoev S. A. Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovyh othodov dushanbinskoj TEC-2 [Complete reproduction of ash and slag wastes from dushanbin CHPP-2]. *Himija i inzhenernaja jekologija-XX*. 2020: 128-131. (In Russ.)
5. Sowjanya S., Adishesu S. Statistical analysis of the physical properties of ternary blended concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022; Vol. 7. No 1: 1-9.
6. Divitkumar R. P. et al. Rheology of Sustainable Self Compacting Concrete with Triple Blend Cementitious Materials. *International Conference on Structural Engineering and Construction Management*. Springer, Cham, 2021: 905-919.

7. Khan R. A., Ganesh A. The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete. *Journal of building materials and structures*. 2016; Vol. 3. No 1: 31
8. Bazhenov Yu. M. Effektivnye betony dlya stroitel'nyh i vosstanovitel'nyh работ s ispol'zovaniem betonogo loma i otval'nyh zol TES [Effective concretes for construction and restoration works using concrete scrap and waste ash from TPPs]. *Vestnik MGSU*. 2008;3: 124-127. (In Russ.)
9. Tolstoy A. D., Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. H., Kovaleva I. A. Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogenogo syr'ya [Powder concretes using man-made raw materials]. *Vestnik MGSU*. Moscow, 2015; 11: 101-109. (In Russ.)
10. Fediuk R.S., Mochalov A.V., Pezin D.N., Timokhin R.A. Self-compacting concrete with the use of plant waste. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(2):294-304. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-294-304>
11. Sheynin A. M., Eckel S. V. Prichina dolgovechnosti [Reason of durability]. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*. 2004;1(29): 62-65. (In Russ.)
12. Salimova B. D., Khudaykulov R. M. Cementobetonnye smesi v stroitel'stve avtomobil'nyh dorog [Cement concrete mixtures in the construction of roads]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020; 3-3 (81): 9-11. (In Russ.)
13. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019; T. 7. №. 3: 12-20.
14. 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; T. 270: 121857.
15. Yousuf A. et al. Fly ash: production and utilization in India-an overview. *J Mater Environ Sci*. 2020; T. 11. no. 6: 911-921.
16. Jose A. et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. *Construction and Building Materials*. 2020; T. 263: 120136.
17. Lal D., Chatterjee A., Dwivedi A. Investigation of properties of cement mortar incorporating pond ash—an environmental sustainable material. *Construction and Building Materials*. 2019; T. 209: 20-31.
18. Lee J. S. et al. A Study on the Possibility of Using Cement Raw Material through Chemical Composition Analysis of Pond Ash //Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. 2020; T. 24. no 6: 180-188.
19. Makhmudov A. M., Trofimov B. Y., Gaforov F. A. Vliyanie kolichestva i dispersnosti zoly na formirovaniye struktury i svoystva cementnogo kamnya [The influence of the amount and dispersion of ash on the formation of the structure and properties of cement stone]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2021; Vol. 21. No 4: 40-47. (In Russ.)
20. Joshi, R.C. Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization. *Indian Geotechnical Conference*. 2010: 16–18.
21. Korovkin M. O., Petukhov A. V. Vysokoprochnyye betony s vysokim soderzhaniiem zoly Kansk-Achinskogo burougol'nogo bassejna [High-strength concretes with high ash content of Kansk-Achinsk brown coal basin]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2017; No 1 :106-112. (In Russ.)
22. Siddique R., Khan M. I. Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media, 2011.
23. Zhang Y., Sun Q., Yang X. Changes in color and thermal properties of fly ash cement mortar after heat treatment. *Construction and Building Materials*. 2018; Vol. 165: 72-81.
24. Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vliyanie zoly gidrodalenija na svoystva tjazhelogo betona dlja stroitel'stva dorozhnogo pokrytija [Influence of hydraulic removal ash on properties of heavy concrete for road pavement construction]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2022; 3: 16–24. (In Russ.)
25. Murtazaiev S. A. Y., Saidumov M. S., Lesovik V. S., Chernysheva N. V., Bataiev D. K. S. Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration for carbonation. *Modern Applied Science*. 2015; T. 9. no 4: 233–245.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Явинский А. В. Формулировка направления и темы исследования, проведение эксперимента, анализ состояния вопросов и результатов исследования, написание, редактирование и оформление статьи.

Чулкова И. Л. Консультации, формулировка направления и темы исследования, анализ состояния вопросов и результатов исследования, написание, редактирование и оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Aleksandr V. Yavinsky. Formulation of the direction and topic of the study, conducting the experiment, analysis of the status of the issues and results of the study, writing, editing and design of the article.

Irina L. Chulkova. Consultation, formulation of the direction and topic of the research, analysis of the status of the issues and research results, writing, editing and design of the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Явинский Александр Викторович – аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство», преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», SPIN-код: 4276-7420.

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 6949-2994.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander V. Yavinsky – Graduate student of the Industrial and Civil Engineering Department, teacher of the Technosphere and Environmental Safety Department, SPIN-код: 4276-7420.

Irina L. Chulkova – Dr. of Sci., Professor, Industrial and Civil Engineering Department, SPIN-код: 6949-2994.