

ВЛИЯНИЕ ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА АКТИВНЫХ ЗОЛ НА ПРОЦЕССЫ ТВЕРДЕНИЯ ЗОЛЬНЫХ И ЗОЛОГРУНТОВЫХ СМЕСЕЙ

DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-74-85

УДК 624.138.24

Источник: <https://img.tourister.ru/files/1/4/5/1/3/2/2/0/original.jpg>**ЛАРИОНОВА Н.А.***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, nin.larionowa@yandex.ru***Аннотация**

Использование зол тепловых станций для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего материала является актуальной проблемой. С увеличением объемов дорожного строительства возрастает расход природных материалов и вяжущих веществ. Активные золы, образующиеся при сжигании твердого топлива, являются ценным вторичным минеральным сырьем и могут использоваться для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего. Их применение позволяет улучшать свойства местных песчаных грунтов и получать строительный материал с заданными свойствами. При этом обеспечивается значительное сокращение расхода традиционных вяжущих веществ. Статья посвящена изучению химико-минерального состава активных зол тепловых станций и определению его влияния на особенности процессов твердения гидратированных зольных и зологрунтовых смесей во времени. Установлено, что химико-минеральный состав и свойства зол зависят от вида используемого топлива, режима его сжигания и способов их улавливания. Определена зависимость прочности, водостойкости и морозостойкости песчаного грунта от: дозировок активных зол; времени твердения образцов зологрунтовых систем; нагрузки уплотнения в процессе изготовления образцов. Наличие свободной окиси кальция в составе зол имеет большое значение при оценке возможности их использования в качестве вяжущего. Однако прямой зависимости интенсивности процесса твердения укрепленных песчаных грунтов и характера изменения их прочностных показателей во времени от содержания свободной извести в составе зол в настоящих исследованиях не выявлено. В значительной степени на процесс твердения оказывает влияние состав и соотношение активных минералов, а также присутствие в золах сернистых и серноокислых соединений. Эффективность использования исследованных зол для укрепления грунтов определяется их химико-минеральным составом, в том числе составом и количеством присутствующих в их составе гидравлически активных клинкерных минералов. Применение зол в качестве самостоятельного вяжущего обеспечивает не только получение строительных материалов необходимого качества, но и способствует обеспечению значительного экономического эффекта при строительстве автомобильных дорог.

Ключевые слова:

высококальциевые золы; укрепленные пески; зологрунт; химико-минеральный состав; прочность; морозостойкость; процесс твердения; свободная известь

Ссылка для цитирования:

Ларионова, Н.А., 2018. Влияние химико-минерального состава активных зол на процессы твердения зольных и зологрунтовых смесей. Инженерная геология, Том XIII, № 3, с. 74–85. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-74-85.

INFLUENCE OF THE CHEMICAL-MINERAL COMPOSITION OF ACTIVE ASHES ON THE PROCESSES OF ASH AND ASH-SOIL MIXTURE HARDENING

LARIONOVA N.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, nin.larionova@yandex.ru

Abstract

Use of ashes of thermal stations to strengthen the soil as an independent binder is an actual problem. It is emphasized that with the increase in the volume of road construction, the consumption of natural materials and binders increases. Active ash produced by the combustion of solid fuel is a valuable secondary mineral raw material and can be used to strengthen the soil as an independent binder. Their use makes it possible to improve the properties of local sandy soils and to obtain a building material with specified properties. At the same time, a significant reduction in the consumption of traditional binders is ensured. The article is devoted to the study of the chemical and mineral composition of active soils of thermal stations and to the determination of its effect on the features of hardening processes of hydrated ash and gold mixtures in time. It is established that the chemical-mineral composition and properties of ashes depend on the type of fuel used, the mode of its combustion, and the methods for their capture. Dependence of strength, water resistance and frost resistance of sandy soil on: dosages of active solids is determined; time of hardening of samples of gold-soil systems; load compaction during the manufacture of samples. It has been established that the strength indices of ash and goldmine systems, the intensity of their change in time, do not depend on the amount of free lime present in the composition of the ashes. The effectiveness of the use of the investigated soils for strengthening soils is determined by their chemical-mineral composition, including the composition and amount of hydraulically active clinker minerals present in their composition. The use of ashes as an independent binder provides not only the receipt of building materials of the required quality, but also contributes to ensuring a significant economic effect in the construction of highways.

Key words:

high calcium ash; reinforced sands; ash-soils; chemical and mineral composition; strength; freeze thaw resistance; hardening process; free lime

For citation:

Larionova, N.A., 2018. Influence of the chemical-mineral composition of active ashes on the processes of ash and ash-soil mixture hardening. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 3, pp. 74–85. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-74-85.

Введение

В настоящее время в связи с увеличивающимся объемом дорожного строительства возрастает потребление строительных материалов. Только при возведении 1 км автомобильной трассы в зависимости от ее категории и местных условий для сооружения земляного полотна требуется от 6 до 60 тыс. м³ грунта, а для создания дренарующих и морозозащитных слоев — около 1,6–6 тыс. м³ песка. Для строительства дорожного основания потребность в щебне или грунте составляет от 0,8 до 5,4 тыс. м³. При этом расход вяжущих материалов для устройства дорожных покрытий может достигать 55–235 т битума и 480–1 700 т цемента. Таким образом, в дорожном строительстве особенно остро стоит проблема использования местных материалов, в том числе и вяжущих веществ.

Проблема рационального использования как природных ресурсов, так и вяжущих материалов приобретает особое значение в соответствии с реализацией государственных, корпоративных и частных программ развития транспортной инфраструктуры. Ее решение может быть основано на разработке технологий с привлечением вторичных минеральных ресурсов, в частности, промышленных отходов, объемы которых с каждым годом увеличиваются. Многие промышленные отходы в результате технологической переработки по своим свойствам зачастую являются уже подготовленным минеральным сырьем и могут использоваться для получения строительных материалов, что особенно актуально в регионах, где ре-

сурсы традиционных дорожно-строительных материалов (высокопрочного щебня, песка, цемента) ограничены.

К числу таких крупнотоннажных отходов относятся золы и золошлаковые материалы, образующиеся при сжигании твердого топлива (уголь, сланцы, торф) на тепловых электростанциях (ТЭС). Золошлаковые отходы (ЗШО) ТЭС являются качественным и дешевым минеральным сырьем. Они могут быть использованы для получения строительных материалов, в частности, при производстве цемента, бетонов, растворов, строительных блоков, а также в дорожном и ландшафтном строительстве.

Проведенные научные исследования и практика дорожного строительства показали, что золы от сжигания твердых видов топлива могут использоваться при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд, в том числе для укрепления грунтов в качестве самостоятельного или комплексного вяжущего. В настоящее время выделяются три направления использования золошлаковых материалов: а) в качестве гранулометрических добавок к грунтам в целях получения смесей оптимального состава; б) в виде самостоятельного медленноотвердеющего вяжущего материала; в) в качестве активной добавки к цементу или известки в составе грунтовых систем.

Песчано-гравийные и песчаные грунты, обладая высокой открытой пористостью, требуют достаточно высоких дозировок портландцемента для обеспечения необходимых прочностных показателей цементгрунта. Особенность золошлаковых материалов, в частности их дисперс-

ность, позволяет использовать такие отходы в качестве добавок к песчано-гравийным грунтам, выполняющим роль заполнителя межзерновых пустот. Это обеспечивает снижение пористости и возможность достижения наибольшей плотности смеси при уплотнении.

При оценке пригодности золошлаковой смеси в области дорожного строительства, в частности для возведения земляного полотна, используется критерий, характеризующийся величиной морозного пучения ($K_{пуч.}$). Этот показатель представляет собой отношение вертикальной деформации пучения при промораживании образца к его первоначальной высоте, выраженной в процентах. Степень пучинистости материалов определяют на образцах, выдержанных 7, 28 и 90 суток.

По степени морозостойкости золошлаковые смеси классифицируют на: непучинистые ($K_{пуч.} < 1\%$), слабо пучинистые ($K_{пуч.} = 1 \pm 3\%$), пучинистые ($K_{пуч.} = 3 \pm 10\%$) и сильно пучинистые ($K_{пуч.} > 10\%$). Непучинистые и слабо пучинистые золошлаковые смеси применяют при возведении насыпей земляного полотна без ограничений. Пучинистые золошлаковые смеси применяются при обязательном проведении комплекса мероприятий по обеспечению устойчивости земляного полотна, особенно верхних слоев. Сильно пучинистые золошлаковые смеси для возведения насыпей земляного полотна не допускаются [8].

Многочисленными исследованиями [4, 7, 8] установлена возможность и целесообразность использования зол для укрепления грунтов в композиции с традиционными вяжущими веществами — цементом или известью. При этом золы проявляют и пуццоланическую активность, способствуя улучшению физико-механических свойств материалов. Активное их использование в качестве заполнителя способствует уменьшению расхода цемента (на 20–40%) без снижения качества цементогрунта. Кроме того, такие добавки обеспечивают высокую механическую прочность песчаных цементогрунтов, их долговечность и морозостойкость.

Ранее проведенными исследованиями [3, 4, 5, 6, 8] была установлена возможность и целесообразность использования активных зол в качестве самостоятельного вяжущего для укрепления грунтов. Для этих целей при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд в качестве самостоятельного вяжущего могут быть использованы золы, обладающие гидравлической способностью.

Возможность использования активных зол для укрепления грунтов базируется на оценке их химико-минерального состава и свойств. К таким золам предъявляются определенные требования, в частности, по содержанию в их составе свободной окиси кальция CaO (не менее 8%) и сернистых и сернокислых соединений (в пересчете на SO_3) — не более 6%. При этом величина удельной поверхности должна быть не менее 3 000 cm^2/g [8].

Несмотря на установленную возможность и целесообразность использования золошлаковых отходов для укрепления грунтов в области дорожно-аэродромного строительства, объем их применения до сих пор остается крайне невысоким (10–15%). В большинстве экономически развитых стран этой проблеме уделяется пристальное внимание. Зола сухого удаления активно используют в производстве строительных материалов. Так, в Германии и Дании применение ЗШО в различных областях строительства достигло практически 100% их годового выхода. До 50–70% годового выхода ЗШО используют в США,

Великобритании, Польше, Китае. Изменения, внесенные в законодательство Индии, привели к повышению в стране объемов утилизации ЗШО с 29,6% годового выхода в 2003–2004 гг. до 53% в 2007–2008 гг., что составило около 70 млн. т в год [8]. К сожалению, в последние годы у нас в стране снизился интерес к использованию таких промышленных отходов, что обусловлено разными причинами. С одной стороны, на большинстве тепловых станций используется гидромеханический способ удаления золошлаковых отходов, а для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего могут использоваться золы сухого удаления определенных видов топлива. С другой стороны, повышенные тарифы грузоперевозок ограничивают широкое их использование для дорожного строительства. Тем не менее стоит подчеркнуть, что золы тепловых станций являются подготовленным вторичным минеральным сырьем и должны применяться для укрепления грунтов.

Влияние химико-минерального состава активных зол на процесс их твердения

Учитывая предъявляемые требования к активным золам, многие исследователи в различных организациях уделяли внимание изучению их химико-минерального состава и выявлению факторов, влияющих на особенности процесса твердения [8]. Именно состав зол определяет возможную область их использования. Кроме того, он оказывает значительное влияние на процесс твердения и структурообразования материалов. Однако сведения по оценке характера связи между составом зол, их гидравлической активностью и процессами твердения в публикациях достаточно ограничены.

В связи с этим целью исследований являлось изучение влияния химико-минерального состава и свойств высококальциевых зол на процесс твердения зольных и золо-грунтовых смесей и, соответственно, на эффективность укрепления песчаных грунтов. Выявление оптимального содержания вяжущих материалов возможно в случае детального изучения их гидравлической активности и механизма твердения, а также особенностей процессов их взаимодействия с грунтами.

К группе активных, обладающих способностью к самостоятельному твердению, относятся золы, образующиеся при сжигании горючих сланцев (Эстонских и Поволжских), некоторых торфов и бурого угля Канско-Ачинского угольного (КАУ) бассейна. Такие золы характеризуются высоким содержанием CaO (20–60%), в том числе $CaO_{своб.}$ (20–30%), и присутствием в их составе клинкерных минералов. Они отличаются повышенными показателями модуля основности $M_o \left(\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} > 1 \right)$ и коэффициента качества.

Целенаправленные исследования по изучению процессов твердения и структурообразования зольного камня, выявлению вклада отдельных компонентов, присутствующих в золах, проведены Л.А. Евдокимовой, С.Д. Воронкевичем, В.А. Мымриным, Е.А. Галибиной, М.А. Савинкиной и др.

Исследованные золы отличались по дисперсности и химико-минеральному составу, который изменяется в широких пределах на тепловых станциях, даже сжигающих топливо одного угольного бассейна. Для исследованных активных зол характерно высокое содержание CaO (общего) 24–38%, в том числе и в свободном состоянии ($CaO_{своб.}$) 3,3–17,7% (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исследованных зол (средние содержания компонентов)							
Наименование зол (месторождение, разрез)	Содержание компонентов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{своб.}	MgO	SO ₃
Сланцевая зола (Прибалтийские сланцы, РФ, Эстония)	30	8	5	38	6,3	4,5	7
Сланцевая зола (Кашпирские сланцы, РФ)	43	10	7	26	4,1	4	10
Буроугольная зола (Ангренское месторождение, Узбекистан)	34	12	12	24	3,3	5	8
Буроугольная зола (Ирша-Бородинский разрез КАУ, РФ)	42	10	7	28	5,9	5,0	4,5
Буроугольная зола (Назаровский разрез КАУ, РФ)	27	9	12	35	9,1	6	7
Буроугольная зола (Березовский разрез КАУ, РФ)	17	7	7	38	11,6	6	4
Торфяная зола (Лидская ТЭЦ, Белоруссия)	28,5	3,8	14	37	17,7	4	3,3

В их составе можно выделить три группы веществ — кристаллические, стекловидные, аморфные. Количественные соотношения этих фаз оказывают влияние на вяжущие свойства зол и определяют их гидравлическую способность.

Кристаллическое вещество представлено как первичными минералами, присутствующими в составе топлива, так и новообразованиями, образующимися в топочном пространстве. Среди них отмечено присутствие магнетита, гематита, кварца, муллита. Сульфаты и карбонаты содержатся в золе всех твердых видов топлива в различных количествах. Из новообразований присутствуют силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция, которые проявляют способность к твердению при взаимодействии с водой.

Содержание гидравлически активных клинкерных минералов в высококальциевых золах изменяется в широких пределах — от 2–3% до 20–25%. Значительное разнообразие присутствующих клинкерных минералов в золах обусловлено многими факторами: не только составом минеральной части топлива, но и температурой его сжигания. Так, при сжигании горючих сланцев при температуре 1 350–1 400°C в большей степени образуются такие минералы, как белит (модификация β -C₂S) и алюминат кальция (CA), содержание которых составляет 2,5–25% и 0,3–2,1% соответственно. При сжигании Канско-Ачинских бурых углей температура горения в ядре факела достигает 1 600°C. В этих условиях кроме β -C₂S может образовываться и алит (C₃S). При благоприятном составе минеральной части могут формироваться: трехкальциевый (C₃A) и однокальциевый алюминат (CA), четырехкальциевый алюмоферрит (C₄AF), двухкальциевый феррит (C₂F). Содержание β -C₂S может достигать 10%, CA — до 2%, C₂F — до 20%. Однако основным минералом остается β -C₂S, который отличается относительно замедленной гидратацией, но при длительном твердении обеспечивает материалам достаточно высокую прочность [9].

Определенной особенностью зол является присутствие в них стекловидной фазы, содержание которой колеблется в пределах от 15 до 60%. Эта фаза состоит преимущественно из стекла, алюмоферритов и ферритов кальция. Стекловидная фаза различных зол отличается по содержанию окислов, которое изменяется в следующих пределах: SiO₂ — 21–28,6%; Al₂O₃ — 10,5–19,7%; Fe₂O₃ — 8,5–11,8% [9]. Эта фаза гидратируется и участвует в формировании зольного камня лишь в присутствии свободной окиси кальция.

Аморфные компоненты зол обладают способностью связывать при обычных температурах гидроксид кальция Ca(OH)₂, образуя нерастворимые соединения. Пуццоланическую активность в составе зол проявляют продукты обжига глин: аморфизированное глинистое вещество типа метакаолинита, аморфные SiO₂, Al₂O₃ и алюмосиликатное стекло. Реакционная способность по отношению к гидроксиду кальция у них различна и зависит от температурных превращений каолиновых глин при сжигании топлива. Метакаолинит AlO₃·2SiO₂, обладающий большой удельной поверхностью, активно реагирует с Ca(OH)₂ при обычных температурах с образованием гидросиликатов кальция и гидрогеленита.

Кроме минеральной составляющей и стекловидной фазы в высококальциевых золах присутствует нерастворимый остаток, содержание которого может составлять 5–25%. Нерастворимая часть зол отличается содержанием SiO₂ и K₂O. На 65–75% нерастворимый остаток состоит из зерен кварца и на 25–35% из ортоклаза, гематита, магнетита и кислого стекла. Эта часть зол не является инертной составляющей, а взаимодействует с известью и связывает CaO тем больше, чем больше в ней присутствует SiO₂. Но степень активизации стекловидной фазы существенно выше, чем нерастворимого остатка. Так, за 28 суток взаимодействия из порового раствора стекловидной фазой, содержащейся в 1 г золы, поглощается 27–57 мг окиси кальция CaO и 17,5–27 мг сернистых и сернокислых соединений (в пересчете на SO₃). Нерастворимая часть в тех же условиях связывает лишь 5–7 мг CaO [1].

На изменение состава и свойств зол оказывает влияние и способ их улавливания (электрофильтрами или батарейными циклонами). Наибольшей дисперсностью отличаются золы, улавливаемые электрофильтрами, их удельная поверхность достигает 3 500–4 000 см²/г, в то время как у зол, улавливаемых батарейными циклонами, этот показатель не превышает 1 700–2 700 см²/г. Установлено, что с увеличением температуры сжигания в определенном диапазоне повышается удельная поверхность зол, но снижается содержание свободной извести в их составе (рис. 1).

При этом снижается содержание SiO₂, Al₂O₃ и Fe₂O₃, но возрастает количество аморфной фазы и SO₃. С изменением содержания этих компонентов повышается отношение CaO/SiO₂ от 2,34 до 3,81 [9]. Золой разного гранулометрического состава отличаются по содержанию гидравлически активных соединений. С увеличением дисперсности

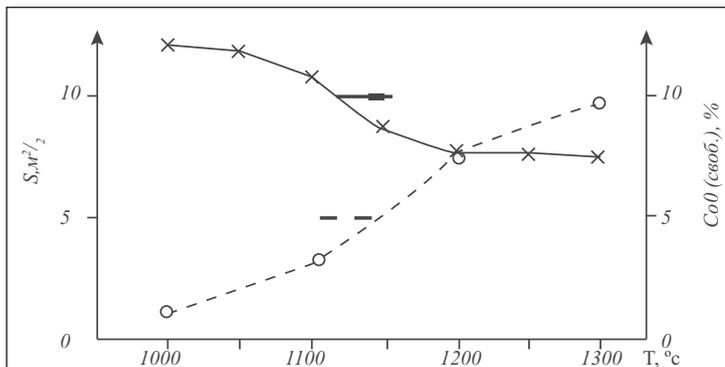


Рис. 1. Изменение удельной поверхности и содержания CaO_{своб.} в золе Березовского месторождения в зависимости от температуры [9]

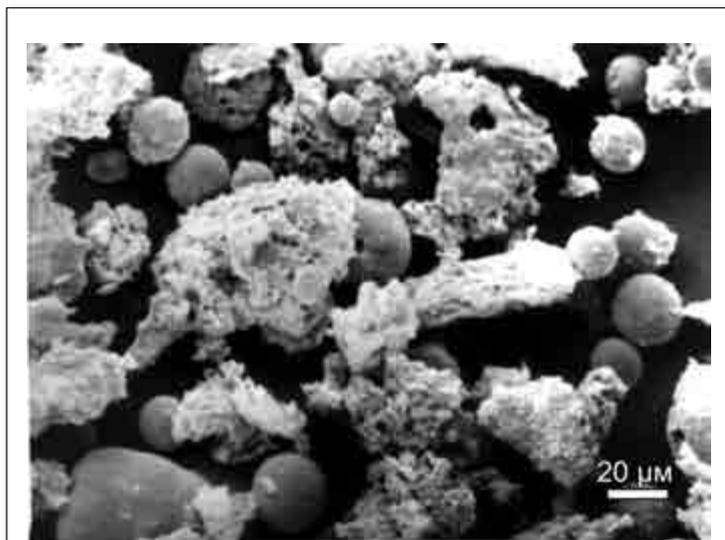


Рис. 2. Распределение сферических частиц и микроагрегатов в торфяной золе сухого удаления (фото В.Н. Соколова)

зол повышается содержание в них клинкерных минералов, тем самым возрастает их гидравлическая активность.

Некоторые исследователи высказывают предположение, что активность образующихся при более высоких температурах аморфных SiO₂ и Al₂O₃ заметно меньше, что объясняется резким снижением удельной поверхности вследствие спекания и кристаллизации новообразований — муллита, кристобаллита. Высокотемпературное спекание и плавление глинистых минералов резко снижают их удельную поверхность и, соответственно, активность. Вследствие этого стеклофаза зол и шлаков малоактивна при обычных температурах. Повышение температуры сжигания топлива сверх допустимого предела приводит к падению активности большинства топливных зол [8].

Частицы большинства зол имеют сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Однородность частиц различна. Более однородны частицы, состоящие полностью из стекла. Имеются частицы, внутренняя часть которых не расплавилась и состоит из мельчайших минеральных зёрен. Встречаются и полые шарики, образующиеся в результате вспучивания стекла. Размер частиц — от нескольких до 50–60 мкм. Могут также образовываться стекловидные частицы неправильной формы. У некоторых частиц поверхность губчатая.

При микроскопических исследованиях торфяной золы сухого удаления отмечается присутствие оплавленных зёрен бурого и черного цвета сферической формы, а также рыхлого губчатого материала. Встречаются удлиненные вспученные агрегаты. Поверхность частиц пористая. В порах агрегатов присутствуют мелкие частицы сферической формы (рис. 2).

Таким образом, в активных золах присутствуют активные компоненты в виде силикатов, алюминатов и ферроалюминатов кальция различной основности, которые могут гидратироваться с различной скоростью. Кроме того, они встречаются в золах в различных сочетаниях и соотношениях, что в свою очередь определяет своеобразие процессов твердения зол как в чистом виде, так и при их использовании для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего.

Оценке гидравлической активности зол различных видов топлива, выявлению влияния дозировок вяжущего при укреплении мелкого песка и свободной окиси кальция в его составе на изменение прочности материалов во времени уделялось особое внимание в исследованиях, проведенных Е.И. Путиным и В.С. Цветковым в СоюзДорНИИ [8]. Подробные исследования по изучению особенностей процессов твердения и структурообразования зол, полученных от сжигания Прибалтийских горючих сланцев и торфа (Белоруссия), проведены на кафедре инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова В.А. Мырным, Л.А. Евдокимовой, С.Д. Воронкевичем, Н.А. Ларионовой, Е.Н. Огородниковой. В настоящее время достаточно ограничены сведения по привлечению торфяных зол для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего. Вероятно, это обусловлено относительно меньшими объемами их образования.

Гидравлическая активность зол в качестве самостоятельного вяжущего оценивалась по изменению прочности образцов, твердевших в нормальных условиях. Образцы готовились при оптимальной влажности и нагрузке уплотнения 15 МПа. Прочность образцов изменяется во времени, что характерно для всех активных зол, но интенсивность ее изменения во времени различна и контролируется химико-минеральным составом (табл. 2).

На основе анализа имеющихся сведений установлено, что для всех исследованных зол наибольший рост прочности образцов отмечается к 90 суткам твердения, и она увеличивается в 1,5–2 раза по сравнению с предыдущим сроком испытаний. Наибольшими показателями прочности отличаются образцы с использованием золы Прибалтийских сланцев. Прочность образцов в начальный период твердения обусловлена гидратацией трехкальциевого алюмината C₃A, CaO, ангидрита и полуводного гипса с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция разного состава, о чем свидетельствуют результаты рентгеноструктурного анализа. За первые 28 суток отмечается набор 53% годичной прочности.

В этот период происходит активизация стекловидной фазы золы свободной известью и дополнительное формирование новообразований за счет протекающих физико-химических процессов. Коэффициент водостойкости образцов равен 0,99, а морозостойкости после 25 циклов замораживания-оттаивания — 0,96–1. К 90 суткам наблюдается значительное снижение извести и свободной SO₃ в системе в результате взаимодействия Ca(OH)₂ с компонентами золы и формирования новообразований в

Таблица 2

Изменение прочности образцов исследованных зол во времени [3, 4, 8]					
Исследованная зола	Содержание свободной (СаО + MgO), %	Прочность при сжатии, МПа			
		Время твердения, сутки			
		28	90	180	360
Зола горючих сланцев* (Прибалтийская ГРЭС, РФ, Эстония) [8]	6,30	7,20	9,80	12,30	13,60
Зола горючих сланцев* (Прибалтийская ГРЭС, РФ, Эстония) [4]	7,80	14,80	16,60	18,40	19,30
Зола горючих сланцев** (Сызранская ТЭЦ, РФ) [8]	4,1	10,2	17,0	9,3	5,7
Зола бурых углей* (Ангренское месторождение, Узбекистан) [8]	3,30	18,70	н.д.	н.д.	96,70
Буроугольная зола* (Назаровская ГРЭС, КАЗ, РФ) [8]	5,9	3,28	8,26	12,31	н.д.
Иркутская ТЭЦ-6* (Ирша-Бородинский разрез КАУ, РФ) [8]	9,1	4,27	8,04	10,83	н.д.
Иркутская ТЭЦ-6** (Ирша-Бородинский разрез КАУ, РФ) [8]	11,6	1,25	1,98	2,08	н.д.
Зола торфяная** (Лидская ТЭС, Белоруссия) [3, 4]	17,7	2,70	5,10	5,50	8,00

Примечания: * — улавливание золы электрофильтрами; ** — улавливание золы батарейными циклонами; н.д. — нет данных

виде трехкальциевого гидросиликата ($C_3S_2H_2$), трехкальциевого гидрокарбоалюмината ($C_3AK_3H_{32}$) и этtringита (C_3AGH_{32}), упрочняющих зольный камень [2].

Прочность практически на всех сроках твердения в 2–3 раза выше, чем на основе остальных исследованных зол. При этом отсутствует прямая зависимость прочности от содержания свободной окиси кальция в золах. Выявлены определенные различия интенсивности протекающих процессов гидратации зол, что проявляется в изменении прочности образцов в различные сроки твердения, обусловленные особенностями их состава, в частности, количеством и соотношением присутствующих в них клинкерных минералов. В дальнейшем интенсивность повышения прочности снижается, и ее увеличение к 180 суткам составляет 0,4–2,5 МПа для различных зол. В период 28–90 суток в образцах отмечается значительное снижение содержания свободной извести, что обусловлено ее расходом на активизацию стекловидной фазы зол и синтез новообразований, обеспечивающих упрочнение зольного камня.

Для образцов гидратированной сланцевой золы Полюжья (г. Сызрань), содержащей 4,1% свободной извести, с увеличением сроков твердения (к 180 суткам) отмечается значительное снижение прочности за счет разуплотнения, что обусловлено особенностями ее состава. Присутствие в составе золы закисного железа и гипса, а также наличие трехкальциевого алюмината (C_3A), определяет специфику процесса твердения и структурообразования зольного камня. Этот минерал способствует активному протеканию процесса гидратации и гидролиза, обеспечивающего значительное повышение прочности материалов. Это обусловлено двумя одновременно происходящими явлениями, характерными для процесса твердения зол. В присутствии или избытке гипса происходит формирование гидросульфалюмината кальция ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 3H_2O$). Его образование на ранних стадиях твердения способствует увеличению прочности, но на поздних сроках приводит к разуплотнению зольного камня. В дальнейшем в результате кристаллизации и увеличения кристаллов этtringита в структуре возникает кристаллизационное давление, вызывающего ее раз-

уплотнение и, соответственно, снижение прочности зольного камня [8].

Анализ кинетики твердения буроугольных зол показал, что для образцов не наблюдается периодов снижения прочности в результате протекающих физико-химических процессов. Среди зол бурых углей лучшие результаты получены на основе золы Ангренского месторождения. Вероятно, это обусловлено повышенным содержанием в ее составе активных клинкерных минералов в виде C_3S , CA , C_3A и $\beta-C_2S$.

Сравнительно низкими показателями прочности отличались образцы циклонной гидратированной золы Ирша-Бородинского разреза (Иркутская ТЭЦ-6), что определялось меньшей ее дисперсностью. На примере этой золы выявлена определенная зависимость содержания свободной извести в ее составе от способа улавливания и, соответственно, от дисперсности. Меньшая дисперсность и снижение в составе золы активных клинкерных минералов определяют замедленный характер твердения и низкую интенсивность повышения прочности образцов.

Для образцов на основе золы Назаровской ГРЭС значительное увеличение прочности отмечается в период 90–180 суток твердения, когда она повышается на 4–5 МПа относительно предыдущего срока испытаний. Это обусловлено преобладанием в ее составе среди клинкерных минералов двухкальциевого силиката (C_2S) и феррита кальция (C_2F), отличающихся замедленным процессом гидролиза и гидратации.

В составе торфяной золы присутствуют кварц, магнетит, кальцит, а среди активных минералов — алит, ранкинит, двухкальциевый силикат (C_2S), двухкальциевый феррит (C_2F), алюминат кальция (CA), браунмиллерит. Она отличается высоким содержанием извести (37,7%), причем 17,7% — в виде свободной окиси кальция. Процесс твердения торфяной золы также носит замедленный характер, что обусловлено меньшим содержанием клинкерных минералов. Известь находится в переобоженном состоянии. Поверхность частиц извести зачастую покрыта оплавленной оболочкой, что делает ее труднодоступной для взаимодействия с водой. Это проявляется в некотором замедлении роста прочности в период 90–180 су-

Изменение прочности укрепленного мелкого песка в зависимости от вида зол, их дозировки и времени твердения [3, 8]					
Месторождение, бассейн, разрез	Добавка золы, %	Прочность при сжатии, МПа (образцы водонасыщенные)			
		Время твердения, сутки			
		28	90	180	360
Зола горючих сланцев					
Прибалтийские сланцы, РФ, Эстония [8]	10	0,40	1,20	3,20	4,00
	15	1,60	3,00	7,60	9,20
	20	3,30	5,90	8,90	10,40
Сланцы Поволжья, РФ [8]	15	1,60	1,80	2,00	2,50
	20	1,80	2,20	2,60	2,80
	25	2,50	3,00	3,90	4,50
Зола бурых углей					
Ангренский бассейн, Узбекистан [8]	10	0,40	0,60	0,90	1,30
	15	0,70	1,20	1,30	1,80
	20	0,80	1,20	1,90	3,00
	25	2,90	4,10	4,60	5,00
Ирша-Бородинский разрез КАУ, РФ [8]	10	0,70	2,60	4,30	5,80
	15	1,10	3,50	5,80	6,90
	20	2,30	4,70	6,30	8,80
Назаровский разрез, КАУ, РФ [8]	15	0,30	0,70	1,10	1,30
	20	0,50	1,10	1,80	2,00
	25	0,80	1,70	2,30	2,60
Зола торфяная					
Торф, Белоруссия [3, 4]	30*	0,8	1,3	1,7	1,9
	30**	1,9	2,1	2,8	3,6

Примечания: * — образцы приготовлены при нагрузке уплотнения равной 3 МПа, ** — образцы приготовлены при нагрузке уплотнения, равной 10 МПа

ток. При этом к 90 суткам твердения в образцах отмечается присутствие не вступившей в реакции взаимодействия с грунтом свободной извести около 2,29%. В дальнейшем (к 360 суткам) ее количество уменьшается до 1,33% [3]. В период 90–180 суток возрастает степень раскристаллизации новообразований.

В начальный период процесс твердения протекает за счет гидратации активных минералов золы с образованием портландита и гидросиликатов кальция. Новообразования в основном представлены гидросиликатами кальция высокой основности типа $C_2SH(D)$, $C_2SH(C)$, C_2SH , но наряду с ними присутствуют гидросиликаты кальция меньшей основности C_2S_2H , $CSH(B)$, $CSH(A)$ [3].

Следует подчеркнуть, что в данном случае не установлена прямая зависимость прочности образцов гидратированных зол от количества содержащейся в их составе свободной извести. Показатели их прочности зависят от состава, количества клинкерных минералов и их соотношения. Гидравлическая активность зол зависит от их дисперсности, и, как отмечалось ранее, образцы гидратированной золы с электрофильтров отличаются большей прочностью по сравнению с золами, улавливаемыми батареями циклонами.

Оценка эффективности использования активных зол для укрепления песчаных грунтов

Установлена возможность и целесообразность использования активных зол для укрепления гравелистых, мелких и пылеватых песков. Однако в ранее проведенных ис-

следованиях большее внимание уделялось определению оптимальных дозировок зол для получения качественных материалов, а сведения по выявлению влияния состава зол на процессы твердения и структурообразования укрепленных грунтов ограничены.

Достаточно подробные и целенаправленные исследования процессов твердения и структурообразования проведены В.А. Мымриным при укреплении глинистых грунтов сланцевой золой Прибалтийской ГРЭС. Рассмотрены закономерности развития процессов твердения зологрунтовых систем, подчеркнута влияние состава глинистых грунтов на процесс их упрочнения [5, 6]. Но при укреплении песчаных грунтов процессы их взаимодействия с компонентами зол протекают несколько иначе, и такой информации в настоящее время недостаточно.

В связи с этим целью исследований являлось изучение влияния состава активных зол на кинетику процесса твердения песчаных грунтов и характер изменения их прочностных показателей во времени. Песчаные грунты использованы для исключения влияния обменных реакций и сорбционных процессов на характер твердения, которые в значительной степени преобладают в системах при укреплении глинистых грунтов вяжущими материалами.

Исследования по определению влияния химико-минерального состава зол сухого удаления на процесс твердения и упрочнения зологрунтовых смесей во времени проводились на мелкозернистых песчаных грунтах при различных дозировках вяжущего. Золой вводилась в песчаный грунт в количестве 10–30% на 100 г смеси. Анализ

кинетики твердения песчаных грунтов, укрепленных золами, показал, что для всех систем характерно повышение прочности образцов с увеличением их дозировки и времени твердения смесей. В табл. 3 приведены усредненные показатели прочности.

При этом выявлены определенные различия протекающих процессов, обусловленные составом и гидравлической активностью зол. Наибольшими показателями прочности отличаются образцы с использованием золы горючих Прибалтийских сланцев, что обусловлено высоким содержанием в ее составе свободной извести (16,5–23%), присутствием клинкерных минералов β - C_2S (2,5–21,8%) и СА (0,3–2,1%), наличием гипса (4,3–8,5) и стекловидной фазы (28–35%). Прочность образцов к 90 суткам твердения увеличивается в 3 раза по сравнению с показателями предыдущего срока. В системе формируются высокоосновные гидросиликаты и гидросульфалоюминаты кальция, обеспечивающие высокие прочностные показатели материала. Уже к 28 суткам твердения в образцах при повышенной дозировке золы отмечается появление кристаллических новообразований, способствующих повышению их прочности. При одинаковых дозировках зол прочность образцов с использованием золы горючих Прибалтийских сланцев в 2–3 раза выше по сравнению с прочностью образцов с использованием золы сланцев Поволжья (рис. 3, 4).

При использовании золы горючих сланцев Поволжья образцы характеризуются меньшими показателями прочности на всех сроках испытаний. На протяжении 180 суток ее рост составляет всего 0,3–0,5 МПа относительно предыдущего срока испытаний. При одинаковой дозировке золы (20%) прочность образцов на поздних сроках твердения на 60–70% ниже, чем в присутствии золы Прибалтийских сланцев. Увеличение дозировки золы до 25% способствует повышению прочности образцов, но ее показатели на поздних сроках твердения (180–360 суток) на 3–5 МПа меньше, чем у смеси с 20%-ной добавкой золы Прибалтийских сланцев. Меньшее содержание свободной извести (4,1–5,3%) и клинкерных минералов в составе золы горючих сланцев Поволжья определяют замедленный характер твердения смеси и, соответственно, сравнительно низкую интенсивность повышения прочности образцов. В приведенном примере отмечен постоянный рост прочности на протяжении 360 суток, и не наблюдается периодов ее снижения в результате протекающих в системе физико-химических процессов.

Анализ процесса твердения мелкого песка, укрепленного буроугольными золами, показал, что лучшими показателями прочности отличаются образцы с добавкой золы Ирша-Бородинского разреза, улавливаемой электрофильтрами. Это прослеживается в использованных дозировках золы на протяжении всех сроков испытаний. Прочность водонасыщенных образцов при 20%-ной дозировке этой золы в 2–2,5 раза выше по сравнению с другими исследованными буроугольными золами (см. табл. 3, рис. 5–8).

Высокая дисперсность золы ($S_{30} = 4000 \text{ см}^2/\text{г}$), а также присутствие в ее составе активных минералов трехкальциевого алюмосиликата C_3AS (25,3%) и полуводного гипса (8%) определяют активность процесса твердения смеси и формирование гидросиликатов и гидросульфалоюминатов кальция, упрочняющих материал.

При одной и той же дозировке зол (20%) Ангренского месторождения и Назаровского разреза образцы укреп-



Рис. 3. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного сланцевой золой (Эстония), от дозировки и времени твердения: 1 — 10% золы, 2 — 15% золы, 3 — 20% золы



Рис. 4. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного сланцевой золой (Поволжье), от дозировки и времени твердения: 1 — 15%, 2 — 20%, 3 — 25%



Рис. 5. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного буроугольной золой Ирша-Бородинского разреза, от дозировки и времени твердения: 1 — 10% золы, 2 — 15% золы, 3 — 20% золы

ленного мелкого песка характеризовались достаточно близкими показателями прочности, особенно на протяжении первых 180 суток твердения. Процесс твердения этих смесей носит замедленный характер, что обусловлено преобладанием в составе зол β - C_2S (6–8%), C_2F (17,1%) и C_3S_2 (11,7%) [8]. Интенсивность увеличения прочности (больше 1–1,5 МПа) отмечается для укрепленного грунта с использованием золы Ангренского месторождения на более поздних сроках испытаний



Рис. 6. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного буроугольной золой Ангренского бассейна, от дозировки и времени твердения: 1 — 10% золы, 2 — 15% золы, 3 — 20% золы; 4 — 25% золы



Рис. 7. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного буроугольной золой Назаровского разреза, от дозировки и времени твердения: 1 — 15% золы, 2 — 20% золы, 3 — 25% золы

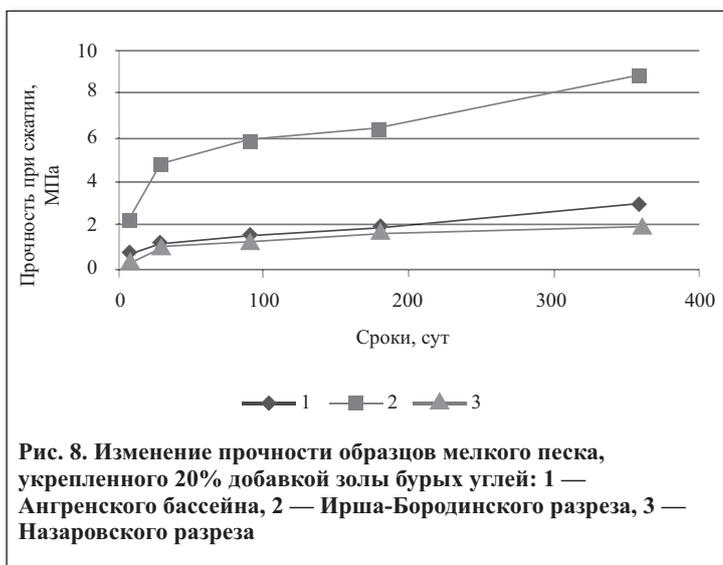


Рис. 8. Изменение прочности образцов мелкого песка, укрепленного 20% добавкой золы бурых углей: 1 — Ангренского бассейна, 2 — Ирша-Борodinского разреза, 3 — Назаровского разреза

(360 сут) (см. рис. 8). Следовательно, активизация процесса твердения зологрунта повышается со временем и с увеличением дозировки золы. По-видимому, это связано с расходом извести на активизацию стекловидной фазы золы и вступлением ее компонентов в процесс формирования новообразований, обеспечивающих упругие свойства материала.

Исследования кинетики твердения флювиогляциального мелкозернистого песчаного грунта, укрепленного 30%-ной добавкой торфяной золы сухого удаления, показали, что прочность зологрунта увеличивается во времени и зависит от нагрузки уплотнения. Высокое содержание извести в составе золы в переобоженном состоянии определяет ее замедленную гидратацию. Активизация пуццоланических реакций за счет взаимодействия извести с компонентами песка определяет интенсификацию процесса твердения и повышение прочности зологрунта. В период с 7 до 28 суток прочность образцов в воздушно-влажных условиях повышается до 1,5 МПа. В результате физико-химических процессов, протекающих в смеси, за первые 28 суток прореагировало около 3,5% извести, внесенной с золой. При этом формируются новообразования различного состава, которые обеспечивают повышение прочностных показателей образцов.

Электронно-микроскопические исследования показали присутствие в системах кристаллических новообразований. Но на отдельных участках отмечено появление усадочных микропространств вокруг частиц золы с недостаточным числом контактов с соседними частицами. Высокая пористость и недостаточная плотность зологрунтовых смесей определяет в целом невысокую их прочность, особенно при нагрузке уплотнения 3 МПа. Для такого зологрунта характерно наличие микродефектов в его структуре (рис. 9).

Замедленный характер твердения зологрунта проявляется на протяжении 90 суток, и только к 180 суткам прочность увеличивается в 1,5–2 раза (до 2,5 МПа), а к годовому сроку — до 3,4 МПа в воздушно-влажных условиях и до 1,9 МПа при водонасыщении. При этом количество свободной извести в системе уменьшается до 1,39%, и практически остается неизменным в течение года (1,33%) [3]. В системе возрастает степень раскристаллизации новообразований, которые заполняют поры и микротрещины в образцах, улучшая их структуру.

На рентгенограммах образцов 180-суточного твердения отмечается присутствие гидросиликатов кальция типа $C_2SH(B)$, $C_2SH(D)$, а также низкоосновных гидросиликатов CSH (фазы А и В). За счет глинозема и окиси железа, присутствующих в составе золы, образуются гидроферриты и гидроалюминаты кальция типа C_3AH_6 ; CAH_{10} [3].

Исследования П.А. Ребиндера и Е.Е. Сегаловой показали, что в основе твердения вяжущих материалов лежат два противоположно направленных процесса: а) формирование кристаллических сростков гидросиликатов и гидросульфалюминатов и б) возникновение и частичная релаксация внутренних напряжений в уже сформированном камне в результате роста кристаллов и растворения мелких, термодинамически неустойчивых соединений. Первый процесс приводит к формированию определенной структуры материала, вследствие чего прочность твердения образцов увеличивается. А второй процесс приводит к возникновению внутренних напряжений и ее снижению.

Высокое содержание свободной извести в составе торфяной золы в переобоженном состоянии определяет замедленный характер твердения и, соответственно, интенсивность повышения прочности зологрунта. Даже в течение длительного срока взаимодействия компонентов золы с песчаным грунтом известь не полностью связывается в

новообразования. В ходе дальнейшего твердения прочность зологрунта продолжает увеличиваться.

Более стабильно протекает процесс твердения в образцах, уплотненных при нагрузке 10 МПа. Они отличаются высокой плотностью, при которой увеличивается число контактов в единице объема материала. Образцы укрепленного песка характеризуются повышенными показателями физико-механических свойств и отсутствием стадий снижения прочности. Для образцов после 28 суток твердения в воздушно-влажных условиях прочность составляла 2,2 МПа, через 60 суток — 2,4 МПа при коэффициенте водостойкости равном 0,6–0,7.

Заключение

Лабораторными исследованиями и практическими работами установлена возможность и целесообразность использования активных зол сухого удаления для укрепления песчаных грунтов в качестве самостоятельного вяжущего при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд. Для этих целей в качестве самостоятельного вяжущего представлено обоснование использования сланцевой и торфяной золы сухого удаления на различных строительных участках автодорог.

Их применение обеспечивает улучшение свойств местных грунтов и получение материалов с заданными свойствами. Активное использование зол для укрепления грунтов способствует снижению расхода традиционных вяжущих веществ на 20–30%. Высококальциевые золы могут использоваться в качестве самостоятельного вяжущего взамен цемента.

Установлено, что химико-минеральный состав зол является определяющим фактором при оценке и выборе их для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего. Состав зол зависит от: вида используемого топлива, режима его сжигания и способов улавливания. Подчеркнуто влияние химико-минерального состава и дисперсности зол на особенности процесса твердения зологрунтов. Отмечено, что процесс твердения гидратированных зол и в композиции с грунтами носит замедленный характер. Наличие свободной окиси кальция в составе зол имеет большое значение при оценке возможности их использования в качестве вяжущего. Но прямой зависимости интенсивности процесса твердения укрепленных песчаных грунтов и характера изменения их прочностных показателей во времени от содержания свободной изве-

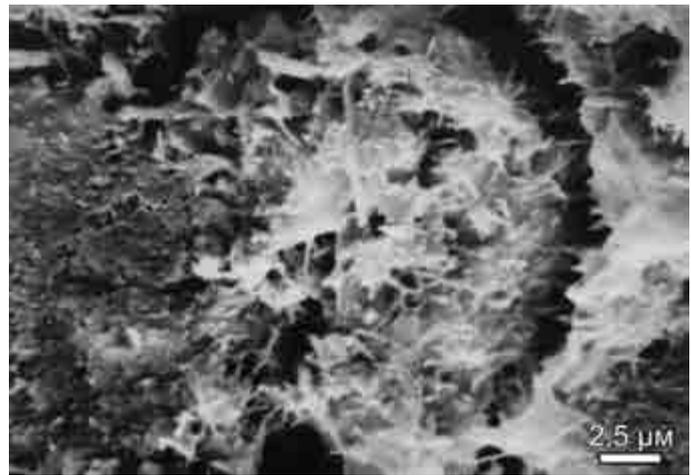


Рис. 9. Формирование кристаллических новообразований в поровом пространстве зологрунта на основе торфяной золы сухого удаления. 28 суток твердения (фото В.Н. Соколова)

сти в составе зол в настоящих исследованиях не выявлено. В значительной степени на процесс твердения оказывает влияние состав и соотношение активных минералов, а также присутствие в золах сернистых и сернокислых соединений.

Эффективность укрепления грунтов зависит от химико-минерального состава и дисперсности зол; нагрузки уплотнения; необходимой дозировки для получения материалов, по своим прочностным показателям отвечающих предъявляемым требованиям к строительным материалам; а также от особенностей состава и свойств укрепляемых песчаных грунтов. Возможное снижение прочности зологрунтов в определенные периоды обусловлены изменением структуры материала, а также трансформацией фазового состава новообразований во времени.

Активное привлечение зол для укрепления грунтов в дорожном строительстве позволит решить не только экономические и экологические задачи, но и повысить процент утилизации золошлаковых отходов. ♻️

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00944а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галибина, Е.А., 1976. Роль шлакового стекла в гидравлической активности сланцевых зол. Цементы и их свойства, Труды VI Международного конгресса по химии цемента, Том III, Москва, 1976, с. 115–119.
2. Евдокимова, Л.А., Мымри, В.А., Воронкевич, С.Д., Домагала, М., 1981. Особенности твердения активной золы-уноса в присутствии глинистых минералов. Геологический бюллетень Варшавского Университета, Том 24, с. 71–87.
3. Евдокимова, Л.А., Ларионова, Н.А., Огородникова, Е.Н., 1984. Химическая активизация зологрунта на основе торфяной золы. В сб. Использование зол ТЭС для закрепления грунтов. Изд-во Московского университета, М., с. 60–76.
4. Ларионова, Н.А., 2017. Использование промышленных отходов в качестве вторичного минерального сырья для получения строительных материалов с заданными свойствами, под ред. В.Т. Трофимова. Геоинфо, М.
5. Мымрин, В.А., Евдокимова, Л.А., Воронкевич, С.Д., 1981. Физико-химические процессы твердения активной золы-уноса. Геологический бюллетень Варшавского Университета, Том 24, с. 25–45.
6. Мымрин, В.А., 1981. Применение активной золы-уноса для укрепления глинистых грунтов. Геологический бюллетень Варшавского Университета, Том 24, с. 123–140.

7. Огородникова, Е.Н., Петрова, Н.В., 1993. Использование зол гидроудаления Алма-атинских ТЭЦ для закрепления грунтов. В сб. под ред. В.Т. Трофимова, Инженерная геология: теория, практика, проблемы, Москва, 1993, с. 84–92.
8. Путилин, Е.И., Цветков, В.С., 2003. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. Союздорнии, М.
9. Савинкина, М.А., Логвиненко, А.Т., 1979. Золо Канско-Ачинских бурых углей. Наука, Новосибирск.

REFERENCES

1. Galibina, E.A., 1976. The role of slag glass in the hydraulic activity of shale ash. Cements and their properties, Proceedings of the VI International Congress on Cement Chemistry, Vol. III, Moscow, 1976, pp. 115–119. (in Russian)
2. Evdokimova, L.A., Mymrin, V.A., Voronkevich, S.D., Domagala, M., 1981. Features of hardening of active fly ash in the presence of clay minerals. Biuletyn Geologiczny Uniwersytetu Warszawskiego, Vol. 24, pp. 71–87. (in Russian)
3. Evdokimova, L.A., Larionova, N.A., Ogorodnikova, E.N., 1984. Chemical activation of a ash-soil on the basis of peat ash. In collection of papers Use of ashes of thermal power plants for fixing soils. Publishing House of Moscow State University, Moscow, pp. 60–76. (in Russian)
4. Larionova, N.A., 2017. The use of industrial waste as a secondary mineral raw material for the production of building materials with specified properties, in V.T. Trofimov (ed.). Geoinfo, Moscow. (in Russian)
5. Mymrin, V.A., Evdokimova, L.A., Voronkevich, S.D., 1981. Physico-chemical processes of hardening of active fly ash. Biuletyn Geologiczny Uniwersytetu Warszawskiego, Vol. 24, pp. 25–45. (in Russian)
6. Mymrin, V.A., 1981. Application of active fly ash to strengthen clay soils. Biuletyn Geologiczny Uniwersytetu Warszawskiego, Vol. 24, pp. 123–140. (in Russian)
7. Ogorodnikova, E.N., Petrova, N.V., 1993. Use of ashes of hydraulic removal of Alma-Ata thermal power stations for soil consolidation. In collection of papers V.T. Trofimov (ed.), Engineering geology: theory, practice, problems. Publishing House of Moscow State University, Moscow, pp. 84–92. (in Russian)
8. Putilin, E.I., Tsvetkov, V.S., 2003. Use of fly ash and ash-slag mixtures in road construction. Overview of domestic and foreign experience in the use of waste from the combustion of solid fuel at TPPs. Soyuzdornii, Moscow. (in Russian)
9. Savinkina, M.A., Logvinenko, A.T., 1979. Ashes of the Kansk-Achinsk brown coals. Science, Novosibirsk. (in Russian)

CAPTIONS TO FIGURES

- Fig. 1. Change in specific surface area and CaO_{free} content in the ashes of the Berezovsky deposit as a function of temperature [9]
- Fig. 2. Distribution of spherical particles and microaggregates in peat ash of dry removal (photo by V.N. Sokolov)
- Fig. 3. Change in strength of samples of fine sand reinforced by shale ash (Estonia) from the dosage and time of hardening: 1 — 10% of ash, 2 — 15% ash, 3 — 20% ash
- Fig. 4. Change in strength of samples of fine sand reinforced by shale ash (Volga region) from the dosage and time of hardening: 1 — 15%, 2 — 20%, 3 — 25%
- Fig. 5. Change in strength of samples of fine sand reinforced by brown coal ash (Irsha-Borodino section) from the dosage and time of hardening: 1 — 10% of ash, 2 — 15% ash, 3 — 20% ash
- Fig. 6. Change in strength of samples of fine sand reinforced by brown coal ash (Angren Basin) from the dosage and time of hardening: 1 — 10% of ash, 2 — 15% ash, 3 — 20% ash, 4 — 25% ash
- Fig. 7. Change in strength of samples of fine sand reinforced by brown coal ash (Nazarovo section) from the dosage and time of hardening: 1 — 15% ash, 2 — 20% ash, 3 — 25% ash
- Fig. 8. Change in strength of samples of fine sand reinforced by adding 20% brown coal ash: 1 — Angren Basin, 2 — Irsha-Borodino section, 3 — Nazarovo section
- Fig. 9. Formation of crystalline neoplasms in the porous space of the ash-soil based on dry removal peat ash. 28 days hardening (photo by V.N. Sokolov)

CAPTIONS TO TABLES

- Table 1. Chemical composition of the investigated ashes (average content of components)
- Table 2. Change in the sample strength of the investigated ashes during time [3, 4, 8]
- Table 3. Change in strength of reinforced fine sand, depending on the type of ashes, their dosage and time of hardening [3, 8]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ЛАРИОНОВА Н.А.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

LARIONOVA N.A.

Senior research scientist of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia



фото В.Л. Аськова



фото В.Л. Аськова