ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Получение легкого золобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения)

Т.Е.ЛИТВИНОВА, Д.В.СУЧКОВ✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Литвинова Т.Е., Сучков Д.В. Получение легкого золобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения) // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 906-918. EDN LMZCWZ

Аннотация. Исследование посвящено разработке способа утилизации техногенного сырья с перспективой вовлечения продукции на его основе в производство новых строительных материалов. Рассмотрены результаты российских и зарубежных исследований, посвященных полезному использованию отходов (фосфогипс, металлургические шлаки, отходы очистки городских и производственных сточных вод и т.д.) в качестве вторичных материальных ресурсов в отрасли строительных материалов. Установлено, что использование золы от сжигания осадка городских сточных вод в строительстве представляется перспективным направлением в совокупности эколого-экономической эффективности. Проведенное исследование подтверждает соответствие компонентов легких бетонов с добавлением золы требованиям нормативной документации по ряду показателей. Разработан состав сырьевой смеси для производства легкого бетона с золой сжигания осадка городских сточных вод в качестве замены части цемента. По параметрам он не ниже стандартного легкого бетона, маркированного как D1300 (плотность не ниже 1,3 г/см^3), Btb2 (прочность на изгиб не менее 2 МПа), M200/B15 (прочность на сжатие не менее 15 МПа), пригодного для использования в строительстве, ремонте автомобильных дорог и благоустройстве городских территорий.

***Ключевые слова*:** вторичные материальные ресурсы; зола сжигания осадка сточных вод; золобетон; очистка сточных вод; строительные материалы; техногенное сырье; утилизация отходов

Поступила: 31.10.2022 ***Принята: 02.03.2023*** ***Онлайн: 22.05.2023*** ***Опубликована: 25.12.2023***

Введение. Для организации объектов размещения отходов приходится выводить из хозяйственного оборота новые площади земель. Масштабы накопленных промышленных отходов в России можно оценить примерно в 80 млрд т. Также размещенные отходы являются комплексным источником загрязнения окружающей среды [1-3]. Вопрос необходимости утилизации многотоннажных производственных отходов представляет собой актуальную экологическую проблему России и мира, учитывая, что эксплуатация объектов размещения сопряжена с выводом земель из хозяйственного оборота и сопутствующим загрязнением [4, 5].

Использование производственных отходов имеет значительные перспективы для наиболее материалоемкой отрасли – строительной индустрии. В условиях роста потребления строительных материалов необходимы новые источники ресурсов для их производства. По данным Перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 г.[1], намечается тенденция дефицита нерудных строительных материалов, которые выступают в качестве инертных заполнителей, – песка, гравия, щебня и т.д. Восполнение дефицита возможно и за счет вовлечения в переработку низкосортного забалансового сырья техногенного происхождения – многотоннажных отходов, в утилизации которых заинтересована промышленность России. Кроме того, свой-

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 октября 2021 г. № 2816-р.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 906-918
© Т.Е.Литвинова, Д.В.Сучков, 2023

ства некоторых отходов позволяют рассматривать возможность их использования не только в качестве инертных заполнителей в строительных материалах, но и для замены вяжущих веществ или полифункциональных добавок, улучшающих качество продукции. Высоким потенциалом полезного использования обладают следующие группы: отходы минерально-сырьевого комплекса (например, фосфогипс); металлургические шлаки; золы-уноса ТЭС; отходы целлюлозно-бумажных комплексов; углеводородсодержащие отходы; отходы очистки городских и промышленных сточных вод. Вовлечение данных групп отходов в ресурсный цикл строительной отрасли (с условием установления их соответствия отраслевым стандартам и нормативным требованиям к компонентам строительных материалов) позволит значительно расширить ассортимент сырья и готовой продукции, а также добиться снижения объемов отходов, направляемых на размещение. При использовании производственных отходов в строительной промышленности основные направления их утилизации можно классифицировать на две группы:

• использование производственных отходов (или их отдельных компонентов с предварительной переработкой и (или) обезвреживанием) для замены природного сырья, схожего с отходами по составу и свойствам;

• использование производственных отходов (или их отдельных компонентов с предварительной переработкой и (или) обезвреживанием) в качестве вяжущих, нейтрализующих, сорбционных, антисептических, красящих компонентов строительных материалов при наличии у отходов особых свойств, позволяющих эффективно использовать их физико-химическую активность [6].

Анализ перспектив использования доступных отходов производства в строительстве. При оценке потенциала использования в отрасли промышленности строительных материалов производственные отходы подразделяются на неорганические (минеральные) и органические вещества. Большинство твердых неорганических производственных отходов (золы, шлаки и т.д.) могут выступать в качестве вяжущего, например замены части цемента без снижения прочностных свойств продукции. В частности, сталеплавильные шлаки содержат оксиды кальция, кремния, алюминия и железа. Наличие указанных веществ необходимо при расчете состава сырьевой смеси клинкера для производства портландцемента [7].

Фосфогипс (ФГ) $CaSO_4 \cdot nH_2O$ – многотоннажный отход этапа получения экстракционной фосфорной кислоты на предприятиях по производству фосфорсодержащих удобрений. Используется в виде добавки в цементный клинкер при его помоле в шаровых мельницах, что необходимо для регулирования сроков схватывания портландцемента [8]. Однако негативные моменты использования ФГ в технологии производства портландцемента схожи с ограничивающими факторами применения ФГ в составе гипсовых вяжущих. Значительное количество водорастворимых фосфор- и фторсодержащих примесей, содержащихся в ФГ, уменьшает степень схватывания и затвердевания цемента; способствует нежелательному газовыделению внутри технологического оборудования, что говорит о необходимости предварительной очистки ФГ от нежелательных примесей.

Содержание в ФГ 80-98 % гидрата сульфата кальция позволяет отнести его к гипсовому сырью. На основе фосфогипсовых вяжущих могут быть получены различные строительные материалы: сухие строительные смеси (для шпаклевок, облицовочной плитки и т.п.); конструкции (панели, плиты) для устройства перегородок; плиты (облицовочные или акустические) для внутренней отделки; материалы и конструкции с повышенным модулем размягчения (для влажных помещений) и др.

Исходные значения дисперсности ФГ (площадь удельной поверхности 3500-3800 $см^2/г$) позволяют исключить помол из технологического процесса. Однако присутствие в отходе до 40 % влаги затрудняет транспортировку из-за потребности в предварительной сушке. Присутствие в ФГ водорастворимых поллютантов, в том числе P- и F-содержащих, делает утилизацию отхода менее рентабельной по сравнению с использованием природного гипса, поскольку подготовка отхода должна включать стадии предварительной очистки. Прочность гипсовых известково-песчаных материалов на основе старого отвального («лежалого») ФГ снижается с увеличением доли отхода, что объясняется ростом коэффициента водопоглощения из-за высокой пористости образующегося полугидрата [9].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Исследования демонстрируют, что в отсутствие предварительной очистки ФГ его обжиг приводит к снижению вяжущих свойств за счет образования безводного $CaSO_4$ под действием P- и F-содержащих соединений. Если содержание ангидрита в ФГ превысит 30 %, это приведет к резкому падению прочности фосфогипсового вяжущего. Примеси свободного фосфора, H_2SO_4 и ряда водорастворимых поллютантов в отходе тормозят твердение вяжущего. Также при обжиге выделяются F-содержащие газы, которые за счет высокой кислотности вызывают сильнейшую коррозию оборудования [10]. Из-за ограничивающих факторов при использовании ФГ в составе строительных материалов необходимо внедрение дополнительных операций по подготовке отхода. Вследствие этого повышаются затраты на производство строительной продукции на основе ФГ и снижается ее конкурентоспособность по сравнению с аналогами. Таким образом, данные направления полезного использования ФГ не реализованы в полной мере и не позволяют утилизовать значительные объемы образующегося отхода.

Некоторые производственные отходы, например осадки сточных вод (ОСВ), обладают полифункциональным ресурсом для воздействия на процессы спекания и формирования структуры керамики и представляют собой ценный материальный ресурс. Испытания показали, что кирпичи с 70-85 % сожженной смеси отходов городских сточных вод имеют надлежащие характеристики и могут эффективно использоваться в качестве строительных материалов [11]. Зола от совместного сжигания органических отходов (рисовой шелухи, древесной щепы и осадков городских сточных вод), пиролизные остатки золы-уноса ТЭС и осадки городских сточных вод могут выступать в качестве замены выгорающим и отощающим добавкам природного происхождения в производстве керамзита [12].

Российские ученые также разрабатывали состав керамики, в основе которой лежали различные неорганические промышленные отходы, в частности золошлаковые отходы ТЭС и буровой шлам с месторождений, добавляемые в керамическое сырье для улучшения свойств, с целью утилизации отходов и предотвращения складирования их на полигонах [13].

Описанные добавки отходов сгруппированы по типу происхождения (отходы горнодобывающей промышленности, обогащения руд, металлургические отходы, шлам, зола, стеклобой, отходы крупнотоннажного строительства и различных химических производственных процессов) с указанием состава керамической смеси, условий формования и обжига, конечной прочности, водопоглощения и других параметров конечных керамических образцов [14].

Использование техногенного сырья в дорожном строительстве. Требования к материалам для дорожного покрытия в разы ниже требований, предъявляемых для использования производственных отходов в качестве компонентов для рекультивации нарушенных территорий или удобрений, из-за обильного содержания в составе тяжелых металлов, которые могут нанести существенный вред окружающей среде.

Продукт сгорания осадка городских сточных вод при комбинации с песком соответствует всем нормам, предъявляемым к материалам, подходящим для дорожных насыпей. На основании ситового анализа установлено, что зольный остаток ОСВ соответствует гравийному песку EN ISO 14688-2:2018 (европейская классификация). Следовательно, можно считать отходы очистки осадка производственных сточных вод пригодными для строительства насыпей дорожного строительства. Протестированный зольный остаток осадка городских сточных вод в смеси с песком в объемном соотношении 3:7 соответствует стандарту, сформулированному к побочным продуктам, собираемым в насыпи дорог. Зола, образованная при сжигании в колосниковой печи, является более перспективным продуктом, чем зола от печей псевдоожиженного слоя, за счет пониженного содержания тяжелых элементов и более крупного размера частиц [15].

В качестве заполнителя при ремонте участков поврежденных дорог за рубежом активно используются золошлаковые смеси. Однако из-за необходимости уточнения механических свойств золошлаковых отходов как техногенного грунта в России использование данных отходов не распространено достаточно широко [16]. Углеводородсодержащие производственные отходы, представленные отработанным моторным маслом и отработанной каучуковой резиной, могут выступать в качестве компонента гидроизоляционных составов [17, 18].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 906-918
© Т.Е.Литвинова, Д.В.Сучков, 2023

Одно из направлений утилизации ФГ – использование для строительства и ремонта дорожных одежд. Но в связи с тем, что ФГ содержит большое количество примесей элементов, относящихся к I и II классам опасности, при его использовании для любых целей (в частности, для строительства дорожных одежд) должны быть оценены состав, свойства и происхождение отхода. Так, некоторые из месторождений фосфатных руд, являющихся сырьем для производства экстракционной фосфорной кислоты (и, как следствие, источником образования ФГ), отличаются повышенным содержанием радионуклидов уран-ториевого ряда, которые концентрируются в отходе. Для месторождений фосфоритов европейско-азиатской зоны (в России – Ковдор, Хибины) повышенная радиоактивность нехарактерна. Тем не менее уровень радиационной безопасности остается одним из важнейших факторов, регламентирующих возможность применения отходов в строительстве.

Эффективность автоклавной технологии производства бетонов доказана практическим опытом ее применения для получения стеновых штучных материалов. При этом многочисленными исследованиями обоснована возможность использования при производстве материалов автоклавного твердения в качестве добавок отходов различных производств (шлаки, золы, шламы, отходы горной промышленности, стеклобой и др.).

Применение минеральных производственных отходов в качестве инертного заполнителя тяжелых и легких бетонов позволяет существенно экономить природное сырье без ухудшения прочностных свойств бетона. В целях экологической и санитарной безопасности возможна переработка золы сжигания ОСВ различного происхождения: станций водоподготовки; городских очистных сооружений; производственных стоков, в частности стоков гальванического производства (с получением качественного золобетона). Данное направление обладает огромным потенциалом по мнению ученых Польши [19], КНР [20], Таиланда [21], Южной Кореи [22], Малайзии [23]. Выбору и обоснованию способов получения золобетона посвящены совместные исследования Хорватии и Великобритании [24], труды ученых Гонконгского политехнического университета [25] и Бирмингемского университета Великобритании [26].

Существует практика включения золы от сжигания осадков городских сточных вод в состав шумозащитного пенобетона автоклавного твердения. Отличается высокими показателями прочности и резистентности к погодным условиям, обладает оптимальными акустическими характеристиками и не оказывает негативного воздействия на здоровье человека [27].

Отработанный осадок городских очистных сооружений, переработанный в золу, может частично заменить цемент в бетонной смеси. Для подтверждения предположения проведен ряд экспериментов, по результатам которых установлена схожесть химического состава оксидных компонентов золы ОСВ и цементной смеси: в золе и цементе преобладают кремнезем (SiO_2), оксид кальция (CaO), глинозем (Al_2O_3). При этом установлено, что зола ОСВ значительно влияет на технические свойства бетона. Проведенные эксперименты на водопоглощение и испытания на сжатие при замене золы ОСВ в размере 10 % от массы цемента показали наилучший результат [28].

На основании выполненного обзора отечественных и зарубежных исследований можно сделать вывод, что промышленность строительных материалов в перспективе может являться крупным потребителем отходов, учитывая, что доля сырья в себестоимости строительной продукции достигает 50 %. Установлено, что применение отходов в строительной отрасли может способствовать расширению ассортимента используемого сырья. Это может быть достигнуто за счет снижения доли использования следующих материалов (при замене их отходами): инертных заполнителей – нерудных строительных материалов, или общераспространенных полезных ископаемых (песок, щебень, гравий); вяжущих компонентов (извести, цемента и гипса).

С учетом более низкой стоимости отходов при реализации их в качестве вторичного материального ресурса (или же нулевой стоимости при организации производства предприятием-отходообразователем), себестоимость изготовления строительных изделий может быть снижена на 10-30 %. При этом получаемые строительные материалы и изделия будут обладать характеристиками не ниже аналогичных, произведенных с применением природного сырья. Основные направления для получения строительных материалов из доступных отходов: получение цемента, гипса и строительных изделий на его основе; производство бетонных смесей и изделий (с использованием отходов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в качестве добавок, связующих или инертного заполнителя), кирпича и керамических строительных материалов, материалов для дорожного строительства. Все направления являются актуальными с учетом текущей стратегии развития экономики РФ.

Как демонстрируют результаты исследований, в том числе апробированных в промышленных условиях, практически все основные строительные материалы могут быть изготовлены с использованием различных производственных отходов. Важно при этом предварительно установить соответствие данных отходов всем необходимым экологическим, санитарным и другим нормативным требованиям к компонентам строительных материалов.

Российские и мировые научные сообщества с начала XXI в. активно занимаются исследованиями отходов водоочистки, их воздействием на компоненты окружающей среды и потенциальными методами их утилизации, однако проблема утилизации отходов водоочистных систем до сих пор не нашла удовлетворительного решения.

Актуальность рассматриваемого вопроса также находит отражение в его соответствии Национальным проектам России 2019-2024 гг. Так, в рамках национального проекта «Экология» планируется строительство и реконструкция очистных сооружений водоотведения с увеличением объемов очищаемых сточных вод, что будет сопровождаться ростом отходов водоотведения. В совокупности с мероприятиями по внедрению новых предприятий по утилизации отходов в рамках проекта «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами» указанные меры приведут к закономерному росту отходов водоочистки (ОСВ) и продуктов их переработки и утилизации.

В России система обращения с отходами водоотведения, представленными в первую очередь ОСВ городских канализационных очистных сооружений, состоит в большинстве случаев из их обезвоживания с последующим размещением на полигонах складирования (иловых картах) [29, 30]. Негативное воздействие отхода на окружающую среду складывается из отчуждения земельных площадей под полигоны складирования и сопутствующего загрязнения атмосферы, почвы и водных объектов [31, 32].

Сжигание (инсинерация) отходов как перспективный способ их утилизации все чаще применяется в различных отраслях, в том числе в области обращения с ОСВ. Термическая деструкция с использованием печей различных конструкций (многоподовые, циклонные и печи с псевдоожиженным «кипящим» слоем) обеспечивает дезинфекцию отходов и рекуперацию теплоты их сгорания для использования в качестве источника энергии или отопления помещений предприятия.

Эффективность использования подобных инсинераторов подтверждается опытом их использования и в других отраслях: обжиг руды или рудных концентратов; сжигание твердых бытовых отходов и отходов сельского хозяйства; деятельность тепловых электростанций. Один из недостатков использования сжигания для утилизации ОСВ – образование продуктов сгорания, содержащих ряд поллютантов (SO_x, NO_x, CO, As, Hg, Cd, Pb, диоксины, фураны и т.д.). Очистка выбросов печей от данных загрязнителей является важной и сложной частью цикла утилизации, однако нагрузка на атмосферный воздух может быть снижена еще на стадии выбора аппаратурного оформления инсинератора. Так, высокая температура при использовании печей «кипящего» слоя (до 1200 °С) позволяет разрушить диоксины и фураны и не допустить их вторичного образования при охлаждении газа без необходимости оборудовать установку камерой дожига отходящих газов [33]. Аспекты применения данной технологии отражены в разработках Центра окружающей среды и устойчивого развития Университета Суррея в Великобритании [34]. Сжигание ОСВ является одним из распространенных способов его утилизации, успешно реализованным в Санкт-Петербурге [35], его использует ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» для снижения объемов образования отходов. Но количество получаемой золы постоянно увеличивается и достигает ~50 тыс. т/год при зольности ОСВ 30-42 %[2]. Непрерывный рост объемов образования отхода, который сопровождается дефицитом свободных площадей для его складирования, подтверждает

[2] Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 11 декабря 2013 г. № 989 «Об утверждении схемы водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга на период до 2025 года с учетом перспективы до 2030 года».

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

необходимость активного решения вопроса утилизации золы. В качестве возможных путей утилизации можно назвать использование в сельском хозяйстве или рекультивации. Однако ценные органические компоненты, присутствующие в ОСВ, полностью разлагаются при сжигании. Также при воздействии на золу кислой среды возможен переход тяжелых элементов, которые концентрируются в ней как в продукте термического разложения, в более растворимую форму и их миграция в окружающую среду, что осложняет регистрацию данного отхода в качестве удобрения [36-38].

На основе проведенного анализа установлено, что в целях экологической и санитарной безопасности возможна переработка золы ОСВ с получением качественного золобетона. Использование отходов для производства строительных конструкций и материалов имеет ряд особенностей. Исходный химический состав отходов способен изменяться в широких пределах в зависимости от особенностей производственных процессов, что должно учитываться при оценке возможности их использования. Важные аспекты использования строительной продукции – длительный срок эксплуатации и наличие прямого контакта с человеком и окружающей средой. Поллютанты, содержащиеся в отходах, могут изменять свои свойства за счет воздействия факторов внешней среды [39, 40]. Так, на строительные конструкции воздействуют влажность и кислотность среды, способствующие возникновению эрозионных процессов. Выщелачивание поллютантов, содержащихся в золе сжигания ОСВ, в совокупности с повышением их растворимости и реакционной способности может привести к миграции загрязнителей в окружающую среду. Атмосферные осадки, поверхностные и подземные воды при этом могут выступать не только как движущая сила эрозионных и выщелачивающих процессов, но и как среда, в которой транспортируются поллютанты на значительные расстояния [41-43]. Таким образом, для подтверждения возможности полезного использования золы ОСВ, как и любого отхода, необходимо сначала установить его опасность для окружающей среды – определить класс опасности [44]. В случае отходов водоотведения, а именно золы сжигания осадка городских сточных вод, основным поллютантом в составе являются тяжелые элементы [45]. При присвоении отходу I-IV классов опасности любая деятельность, связанная с его утилизацией, должна осуществляться только на основании лицензии с учетом положений федерального законодательства[3,4]. Таким образом, исследование нацелено на решение актуальной проблемы полезной утилизации отходов водоотведения с обоснованием перспектив их использования в строительстве как одной из наиболее материалоемких отраслей народного хозяйства.

Методология. Исследование реализуется на основе лабораторной и экспериментальной базы аккредитованного научно-образовательного центра Горного университета с использованием уникального оборудования Центра коллективного пользования, научных центров «Оценка техногенной трансформации экосистем» и «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов».

Отбор проб золы сжигания ОСВ городских очистных сооружений выполнен с учетом требований к отбору проб отходов [46]. Перечень выполненных экспериментальных исследований по оценке возможности использования золы осадка городских сточных вод в качестве компонента бетона с указанием сведений об используемом оборудовании, а также о нормативной документации, регламентирующей требования к видам исследований, представлен в табл.1. Оценка степени загрязнения и установление класса опасности производственного отхода выполнены в соответствии с актуальными требованиями российского природоохранного законодательства[5]. Результат определения класса опасности подтвержден посредством биотестирования водной вытяжки отхода с использованием тест-культуры водоросли хлорелла. Для получения сведений о качественном составе отхода использован метод рентгенофлуоресцентного анализа. Количественное содержание тяжелых элементов, выбранных на основании качественного анализа, установлено в ходе атомно-абсорбционной спектроскопии [47].

[3] Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (ред. от 14.07.2022).
[4] Федеральный закон от 4 мая 2011 г. № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» (ред. от 30.12.2021).
[5] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 декабря 2014 г. № 536 «Об утверждении критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени воздействия на окружающую среду» (зарегистрировано в Минюсте России 29 декабря 2015 г. № 40330).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Структура экспериментальных исследований по оценке возможности использования золы ОСВ в качестве компонента бетона

Вид работ	Оборудование и материалы	Нормативная и методическая документация
Отбор проб золы ОСВ	–	ПНД Ф 2.1:2:2.2:2.3:3.2-03
Определение характеристик золы ОСВ как компонента бетона	–	ГОСТ 25818-2017 ГОСТ 25820-2014 ГОСТ 31108-2003 ГОСТ 9758-2012 РД 34.09.603-88
Влажность	Инфракрасный термогравиметрический анализатор влажности МОС-120Н (Shimadzu, Япония)	ГОСТ Р 54232-2010
Плотность (истинная и насыпная)	Песчаная баня, весы лабораторные	ГОСТ 12536-2014
Установление класса опасности (биотестирование)	Культиватор КВМ-05 (Россия), определитель оптической плотности ИПС-03 (Россия)	ПНД Ф Т 14.1:2:4.10-04 Приказ от 4 декабря 2014 г. № 536
Радиологические измерения	Гамма-радиометр РКГ-АТ1320С (Атомтех, Беларусь)	ГОСТ 30108-94
Гранулометрический состав	Сита лабораторные, весы лабораторные, лазерный анализатор размеров частиц LA-950V2 (Horiba, Япония)	ГОСТ Р 55566-2013
Химический состав:		
содержание тяжелых элементов (качественный и количественный состав)	Портативный анализатор металлов Niton XLt 898 (США), спектрометр ААС-7000 (Shimadzu, Япония)	ГОСТ 5382-2019 М-МВИ-80-2008
содержание SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, SO_3, P_2O_5	Последовательный волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр LabCenterXRF-1800 (Shimadzu, Япония)	ГОСТ 5382-2019
свободный оксид кальция $CaO_{св}$	–	ГОСТ 5382-2019
Приготовление бетонной смеси и образцов золобетона	Прибор «Вика», разборные формы для изготовления образцов	ГОСТ 10180-2012 ГОСТ 310.4-81 ГОСТ 310.3-76
Определение характеристик золобетона:		
Плотность	Весы лабораторные	ГОСТ 12730.1-2020
Прочность на изгиб и сжатие	Испытательная машина на сжатие и растяжение при изгибе ToniPRAX (Германия)	ГОСТ 10180-2012 ГОСТ 310.4-81 ГОСТ 25820-2014

На основании полученных данных об отнесении отхода к определенному классу опасности рассмотрен способ утилизации – применение в качестве компонента строительных материалов. Установлено соответствие золы сжигания ОСВ требованиям нормативной и справочной документации, которые выдвигаются к аналогичному сырью. В зависимости от компонента строительного материала, который планируется заменить отходом (в рамках исследования – цемент в составе цементно-песчаной смеси), к основным показателям отхода, исследованным по соответствующим методикам, относятся: гранулометрический состав; плотность; содержание оксидных форм SiO_2, MgO, CaO (в том числе $CaO_{св}$); радиологические характеристики.

Обязательным этапом испытаний образцов строительных материалов, полученных с использованием производственных отходов, является установление их соответствия нормативам по следующим характеристикам: плотность, прочность на изгиб и сжатие (в зависимости от требований к определенному виду строительных материалов). По результатам испытаний образцам строительных материалов на основе золы ОСВ присвоены класс или марка по упомянутым параметрам в соответствии с нормативной документацией. На основании данных показателей подтверждена возможность применения продукции на основе производственных отходов в различных отраслях строительства.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 906-918
© Т.Е.Литвинова, Д.В.Сучков, 2023

Результаты. Для подтверждения возможности использования золы рассчитан класс опасности отхода на основании загрязнения пробы тяжелыми элементами. На основе данных о качественном составе золы, полученных при помощи метода рентгенофлуоресцентного анализа, выбран перечень элементов для проведения количественного анализа: Pb, Zn, Mn, Cu в соответствии с методикой проведения измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Зафиксированы следующие превышения соответствующих нормативов предельно допустимых (ПДК) и ориентировочно допустимых (ОДК) концентраций химических веществ в почве согласно СанПиН 1.2.3685-21: Zn (7,9 ОДК); Pb (6,3 ПДК); Cu (3,7 ОДК) (табл.2). В табл.2 полужирным выделены элементы, для которых наблюдается превышение нормативов ПДК/ОДК (соответствующие коэффициенты концентрации больше 1). Суммарный показатель загрязнения равен 15,9 (низкая степень загрязнения). Отнесение отхода к IV классу опасности подтверждено при помощи ПО «Расчет класса опасности отходов 2.0» и по результатам биотестирования водной вытяжки [48].

Таблица 2

Содержание тяжелых элементов в золе сжигания ОСВ [48]

Элемент	Валовое содержание, мг/кг			Коэффициент концентрации	Элемент	Валовое содержание, мг/кг			Коэффициент концентрации
	C_i	$ПДК_i$	$ОДК_i$			C_i	$ПДК_i$	$ОДК_i$	
Zn	1740	–	220	**7,9**	**Cu**	492	–	132	**3,7**
Pb	200	32	–	**6,3**	Mn	965	1500	–	0,6

В ходе испытаний установлено соответствие золы как компонента бетонной смеси ряду требований нормативной и справочной документации. Как компонент строительных материалов зола соответствует I классу (удельная эффективная активность естественных радионуклидов (ЕРН) $А_{эфф} \leq 370$ Бк/кг) – материал может применяться в строительстве любых объектов, в том числе жилья. Содержание отдельных радионуклидов также не превышает допустимых норм согласно ГОСТ 30108-94. Результаты оценки удельной активности естественных радионуклидов, Бк/кг: Ra-226 73±12; Th-232 60±10; K-40 670±110; Cs-137 3,7±1,5; $А_{эфф}$ 211±20. Общие результаты экспериментальных исследований по оценке соответствия золы нормативным требованиям к компонентам бетонов представлены в табл.3.

Таблица 3

Установление соответствия полученных результатов оценки состава и свойств золы ОСВ нормативным требованиям

Показатель	Значение	Требование
C_i, % по массе		
SiO_2	34,66	≥ 25
Fe_2O_3	13,93	$SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 \geq 65$
Al_2O_3	13,28	
CaO	8,69	< 10
MgO	3,53	≤ 5
SO_3	1,86	≤ 5
Na_2O	1,35	≤ 3
P_2O_5	17,5	–
Влажность, %	0,46	≤ 1
Остаток на сите 0045, %	60,00	> 40
Модуль кислотности	1,83	> 1
$CaO_{св}$, %	0,56	≤ 1
Истинная плотность, г/см^3	2,64	> 2
Насыпная плотность, г/см^3	0,62	< 0,8 ≤ 1,3
Удельная активность ЕРН $А_{эфф}$, Бк/кг	211±20	≤ 370

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

По итогам испытаний отход охарактеризован как кремниевая (ГОСТ 31108-2003 «Цементы общестроительные. Технические условия») легкая зола с транспортной влажностью $W = 0{,}56$ %. Коэффициент неоднородности $K_н = 0{,}45$, что говорит об однородности отхода, состоящего преимущественно из тонкодисперсных частиц; дисперсность по остатку на сите 0045 соответствует III классу (ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»). Отход также удовлетворяет основным требованиям, выдвигаемым при использовании в качестве компонента бетона, по содержанию (%) оксидных форм MgO, SO_3, Na_2O (ГОСТ 25818-2017), а также по содержанию $CaO_{св}$ (ГОСТ 31108-2003). Содержание CaO (ГОСТ 25818-2017) и значение модуля кислотности позволяют классифицировать золу как кислую. Установленное значение суммарного содержания $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$ (61,87 % по массе) несколько ниже требований соответствующего показателя для кислых зол (≥ 65 % по массе). Ввиду того, что метод рентгенофлуоресцентного анализа является полуколичественным, результат можно считать удовлетворяющим требованию. Отход входит в допустимый диапазон значений истинной и насыпной плотности как плотный заполнитель для легких бетонов (ГОСТ 25820-2014 «Бетоны легкие. Технические условия»).

По данным исследований, присутствие в цементе оксида фосфора (V) P_2O_5 в концентрации более 1-2 % может негативно влиять на гидратационную активность вяжущего (снижаются прочностные характеристики бетона, увеличиваются сроки схватывания). Зафиксированное содержание P_2O_5 (17,5 % по массе) в золе сжигания ОСВ значительно превышает указанное значение. Тем не менее основные требования к химическому составу цемента, которые содержатся в действующей нормативно-методической документации, не регламентируют предельное содержание оксида фосфора (V) (ГОСТ 31108-2003). Таким образом, применение золы ОСВ в качестве компонента строительных материалов допустимо, если при проведении испытаний будут обеспечиваться требуемые показатели золобетона.

На основании анализа отечественных и зарубежных исследований предложен следующий компонентный состав бетонной смеси – цемент:песок:вода = 1:3:0,5 (принято за контрольный образец). В опытных образцах часть цемента (до 50 % по массе) заменена золой сжигания ОСВ. Необходимое количество воды затворения для каждого из опытных образцов установлено с учетом показателей нормальной густоты цементного теста.

Прочностные характеристики опытных образцов установлены в ходе испытаний на изгиб и сжатие по достижении золобетоном проектного возраста 28 сут. По итогам измерений в соответствии с действующим в строительной сфере нормативным законодательством образцам присвоены класс или марка по параметрам, представленным в табл.4 (полужирным выделены опытные образцы, для которых сохраняются прочностные характеристики (класс или марка) на уровне не ниже контрольного образца).

Таблица 4

Результаты определения прочностных характеристик золобетона

Номер образца	Цемент, замененный золой, % по массе	Плотность, г/см³	Марка D	Прочность на изгиб, МПа	Класс Btb	Прочность на сжатие, МПа	Класс B	Марка M
Контрольный	**0**	1,35		2,16		19,50		
1	**5**	1,33	**1300**	2,05	**2**	16,84	15	**200**
2	**10**	1,31		2,00		15,69		
3	15	1,28		1,42	1,2	10,25	10	150
4	20	1,28	1200	1,23		9,40	7,5	100
5	25	1,25		1,17	0,8	7,29	5	75
6	30	1,20		1,11		7,25		
7	50	1,10	1100	0,73	0,4	3,74	3,5	50

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 906-918
© Т.Е.Литвинова, Д.В.Сучков, 2023

Установлено, что зола сжигания ОСВ городских очистных сооружений соответствует требованиям, выдвигаемым к компонентам легких бетонов. В ходе испытаний образцов золобетона отмечается снижение значений испытуемых показателей в образцах с добавлением золы по сравнению с контрольным, что может быть связано с повышенным содержанием в золе сжигания ОСВ оксида фосфора (V). Тем не менее подтверждена сохранность прочностных свойств бетона при замене золой цемента в пределах до 10 % по массе. Бетонной продукции на основе золы присвоены: марка D1300 (плотность не ниже 1,3 г/см^3); класс Btb2 (прочность на изгиб не менее 2 МПа); класс В15 и марка М200 (прочность на сжатие не менее 15 МПа).

В перспективе стройматериал на основе золы может использоваться для получения различных бетонных изделий: строительных блоков (полнотелых и пустотелых) для стен производственных и энергетических зданий; элементов благоустройства (газонные решетки, водосточные желоба, лотки, столбовые камни); тротуарной плитки различных форм; бордюрных блоков; элементов железнодорожной инфраструктуры (панели ограждения, столбы километровые, столбики пикетные, розетки для пикетных столбов и т.д.). В зависимости от вида бетонной продукции необходимо провести дополнительные исследования по установлению значений характеристик, регламентируемых нормативными документами, в частности показателей морозостойкости и водонепроницаемости разработанного материала с использованием золы. В ходе исследования подтверждены прочностные характеристики именно легкого золобетона – на основе цементно-песчаной смеси. В зависимости от требований потребителей бетонных изделий на основе золы можно достичь и более высоких показателей прочности – за счет внесения крупного заполнителя (например, щебня, отсева и т.д.). Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение характеристик золобетона и разработку новых составов золобетонных смесей.

Сырьевая смесь для производства легкого золобетона и продукция на ее основе могут быть успешно реализованы организациями-застройщиками, дорожными строителями, компаниями, занимающимися благоустройством промышленных и городских территорий, и другими организациями, заинтересованными в бетонной продукции. Данные направления особенно актуальны в условиях мегаполисов и расширяющихся городских промагломераций. Реализация бетонной продукции городскому хозяйству будет способствовать улучшению качества жизни населения за счет развития благоприятной городской среды.

Рентабельность применения золы в качестве компонента золобетона можно оценить на примере линии по производству бетонных блоков методом вибропрессования. Замена части цемента снижает себестоимость продукции. При работе в наиболее перспективный для реализации продукции сезон (май – октябрь) срок окупаемости производства составит менее года. Использование 30 % производственной мощности вибропрессующей установки позволит утилизировать более 16 т/год золы ОСВ или термически обработанных отходов, объемы производства достигнут 250 тыс. бетонных изделий в год.

На российском рынке функционирует большое число производителей строительных изделий – рынок является конкурентным. С учетом того, что на рынке материалов, приобретаемых строительными организациями, ежегодно растут цены, организация производства строительных материалов на основе доступных отходов производства позволит достичь снижения себестоимости продукта. Рост стоимости кирпичного и панельного строительства приводит к увеличению спроса на самостоятельное возведение жилых и производственных сооружений, при этом блоки и стеновые камни из бетона являются популярным строительным материалом в данной области. Торговая деятельность предприятий по производству строительных материалов подвержена сезонности продаж. Пиковые значения спроса приходятся на май – октябрь, т.е. на строительный сезон, при этом разница между продажами в пиковый сезон и в сезон спада может составлять 30 %.

Статистика демонстрирует уверенный спрос на строительные материалы на основе доступных отходов производства в РФ. Реализация продукции возможна через разные каналы сбыта: продажу в розницу со склада предприятия; заключение контрактов со строительными компаниями; поставки на строительные рынки и др. Перспективы использования предлагаемой разработки находят подтверждение в стратегии развития промышленности строительных материалов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Т.Е.Литвинова, Д.В.Сучков, 2023

Заключение. Результаты разработки способа вовлечения отходов водоотведения во вторичный оборот в качестве компонента строительных материалов (золобетона) способствуют решению следующих задач:

• повышения комплексности переработки отходов водоотведения как многокомпонентного сырья техногенного происхождения;

• утилизации отходов в одном из технологических процессов производства строительных материалов в качестве вторичных материальных ресурсов;

• снижения негативного воздействия на окружающую среду от объектов размещения отходов за счет освобождения площадей и предотвращения складирования отхода в дальнейшем;

• расширения сырьевой базы строительных материалов – получение сырьевой смеси для производства бетона на основе термически обработанных отходов для гражданского строительства;

• снижения доли использования природных сырьевых ресурсов, требующихся для производства бетона аналогичного качества.

Снижение себестоимости бетонной продукции по сравнению с аналогами достигается за счет следующих факторов: уменьшения объемов исходного сырья (цемента) за счет замены части цемента (до 10 %) термически обработанными отходами; утилизации отходов – предотвращает направление отходов на размещение, избавляя компанию от платы за негативное воздействие на окружающую среду (по состоянию на 2023 г. ставка платы за размещение отходов IV класса опасности – 835,38 руб./т) и от транспортных издержек, связанных с вывозом отходов. Все это повышает конкурентоспособность как продукции, так и технологического решения.

По итогам научного исследования получен патент на изобретение РФ № 2738072 «Сырьевая смесь для производства легкого золобетона» от 13 мая 2020 г. (что говорит о новизне разработки) и подготовлены рекомендации по его внедрению для ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ОАО «РЖД», Комитета по благоустройству Правительства Санкт-Петербурга и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lytaeva T.A., Isakov A.E.* Environmental impact of the stored dust-like zinc and iron containing wastes // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol. 18. Iss. 3. P. 37-42. DOI: 10.12911/22998993/69355

2. *Lytaeva T.A., Isakov A.E.* Recycling of dust-like zinc and iron containing wastes of electric furnace steelmaking // International Journal of Ecology and Development. 2017. Vol. 32. № 2. P. 115-120.

3. *Strizhenok A., Tcvetkov P.* Ecology-economical assessment of new reclamation method for currently working technogenic massifs // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol. 18. Iss. 1. P. 58-64. DOI: 10.12911/22998993/66251

4. *Danilov A., Smirnov Yu., Korelskiy D.* Effective methods for reclamation of area sources of dust emission // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol. 18. Iss. 5. P. 1-7. DOI: 10.12911/22998993/74947

5. *Коротаева А.Э., Пашкевич М.А.* Применение данных спектральной съемки для экологического мониторинга водной растительности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. С. 231-244. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_231

6. *Пугин К.Г., Пугина В.К.* Особенности использования ресурсного потенциала отходов производства для получения строительных конструкций и материалов // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-2. С. 289-293.

7. *Tianming Gao, Tao Dai, Lei Shen, Li Jiang.* Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 282. № 124538. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124538

8. *Isteri V., Ohenoja K., Hanein T. et al.* Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterisation // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 154. № 106715. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106715

9. *Золотухин С.Н., Кукина О.Б., Абраменко А.А. и др.* Исследования процессов структурообразования дисперсных материалов при получении строительных композитов с заранее заданными свойствами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 5 (74). С. 93-106. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-5-93-106

10. *Zihao Jin, Baoguo Ma, Ying Su et al.* Preparation of eco-friendly lightweight gypsum: Use of beta-hemihydrate phosphogypsum and expanded polystyrene particles // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 297. № 123837. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123837

11. *Erdoğmuş E., Harja M., Gencel O. et al.* New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42. № 102471. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102471

12. *Yuchi Chen, Jingwen Shi, Hao Rong et al.* Adsorption mechanism of lead ions on porous ceramsite prepared by co-combustion ash of sewage sludge and biomass // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 702. № 135017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135017

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Guryeva V.A., Doroshin A.V., Dubineckij V.V.* Sludge of the Fuel-Energy and Oil-Producing Complex in the Production of Wall Ceramic Products // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. P. 1036-1042. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.1036

14. *Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R. et al.* Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000-2015 // Waste Management. 2017. Vol. 60. P. 230-246. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.11.008

15. *Zabielska-Adamska K.* Sewage Sludge Bottom Ash Characteristics and Potential Application in Road Embankment // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 1. № 39. DOI: 10.3390/su12010039

16. *Лунёв А.А., Сиротюк В.В.* Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натурных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 215-227. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227

17. *Sang-Tae Park, Jong-Yong Lee, Sang-Keun Oh.* A Study on the Practical Use of Synthetic Polymerized Rubber Gel Waterproofing Materials Based on the Mixture of Waste Oil and Waste Rubber // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 18. № 9298. DOI: 10.3390/app12189298

18. *Smirnova O.M., Menéndez Pidal de Navascués I., Mikhailevskii V.R. et al.* Sound-Absorbing Composites with Rubber Crumb from Used Tires // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 16. № 7347. DOI: 10.3390/app11167347

19. *Rutkowska G., Wichowski P., Franus M. et al.* Modification of Ordinary Concrete Using Fly Ash from Combustion of Municipal Sewage Sludge // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 2. № 487. DOI: 10.3390/ma13020487

20. *Xiaoliang Fang, Lei Wang, Chi Sun Poon et al.* Transforming waterworks sludge into controlled low-strength material: Bench-scale optimization and field test validation // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 232. P. 254-263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.091

21. *Saphongxay K., Tuakta C., Jongprateep O.* Industrial wastewater sludge as potential filler materials for fabrication of lightweight concrete blocks // Suranaree Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 29. № 2. № 010118. P. 1-8.

22. *Chakraborty S., Byung Wan Jo, Jun Ho Jo, Baloch Z.* Effectiveness of sewage sludge ash combined with waste pozzolanic minerals in developing sustainable construction material: An alternative approach for waste management // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 153. P. 253-263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.059

23. *Siew Choo Chin, Doh Shu Ing, Kusbiantoro A. et al.* Characterization of sewage sludge ash (SSA) in cement mortar // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. № 4. P. 2242-2247.

24. *Vouk D., Nakic D., Štirmer N., Cheeseman C.R.* Use of sewage sludge ash in cementitious materials // Reviews on Advanced Materials Science. 2017. № 49. P. 158-170.

25. *Pingping He, Chi Sun Poon, Tsang D.C.W.* Using incinerated sewage sludge ash to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement (MOC) // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 147. P. 519-524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.187

26. *Lynn C.J., Dhir R.K., Ghataora G.S., West R.P.* Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 98. P. 767-779. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.122

27. *Титова Т.С., Макарова Е.И., Дудкин Е.П.* Использование в строительстве автоклавного шумозащитного пенобетона // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 2 (54). С. 1-7.

28. *Baeza-Brotons F., Payá J., Galao O. et al.* Concrete for Precast Blocks: Binary and Ternary Combination of Sewage Sludge Ash with Diverse Mineral Residue // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 20. № 4634. DOI: 10.3390/ma13204634

29. *Валетов Д.С., Кащенко О.В.* Анализ методов утилизации осадков городских сточных вод // Academy. 2018. № 12 (39). С. 16-20.

30. *Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K. et al.* Sewage sludge disposal strategies for sustainable development // Environmental Research. 2017. Vol. 156. P. 39-46. DOI: 10.1016/j.envres.2017.03.010

31. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Власова Е.В.* Биогеохимическая и геоботаническая оценка состояния морских экосистем (г. Новороссийск) // Вода и экология: проблемы и решения. 2015. № 3. С. 67-80.

32. *Пашкевич М.А., Бек Дж., Матвеева В.А., Алексеенко А.В.* Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 125-130. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.125

33. *Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р.* Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4. С. 52-63. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034

34. *Kleemann R., Chenoweth J., Clift R. et al.* Comparison of phosphorus recovery from incinerated sewage sludge ash (ISSA) and pyrolysed sewage sludge char (PSSC) // Waste Management. 2017. Vol. 60. P. 201-210. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.055

35. *Рублевская О.Н., Васильев Б.В., Протасовский Е.М., Петров С.В.* Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 10. С. 47-51.

36. *Alvarenga P., Mourinha C., Farto M. et al.* Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors // Waste Management. 2015. Vol. 40. P. 44-52. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.027

37. *Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. et al.* Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 376. DOI: 10.3390/min12030376

38. *Петрова Т.А., Рудзиш Э.* Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 767-776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16

39. *Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Pyagay I.N.* Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review) // Fuel. 2022. Vol. 310. Part A. № 122265. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122265

40. *Пашкевич М.А., Харько П.А.* Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов // Обогащение руд. 2022. № 4. С. 40-47. DOI: 10.17580/or.2022.04.07

41. *Fedoseev I.V., Barkan M.Sh., Kornev A.B., Danilov A.S.* Theoretical Foundations and Technological Capabilities of Hydrocarbonyl Process of Recovering Copper from Technogenic Wastes // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 5. P. 33-37. DOI: 10.12911/22998993/91264

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

42. *Матвеева В.А., Петрова Т.А., Чукаева М.А.* Очистка дренажных вод хвостохранилищ АО «Апатит» от молибдена // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 42-47. DOI: 10.17580/or.2018.02.08

43. *Рыжова Л.В., Гендлер С.Г., Титова Т.С.* Управление экологической безопасностью при обращении с грунтами, образующимися при строительстве объектов метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10 (32). С. 29-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-1032-29-41

44. *Ivanov A.V., Smirnov Yu.D., Petrov G.I.* Investigation of Waste Properties of Subway Construction as a Potential Component of Soil Layer // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 5. P. 59-69. DOI: 10.12911/22998993/91267

45. *Barkan M., Kornev A.* Development of new technological solutions for recovery of heavy non-ferrous metals from technogenic waste of electroplating plants and sludge of water treatment systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Т. 2. Вып. 10 (92). P. 17-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128532

46. *Сарапулова Г.И.* Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 388-392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388

47. *Чукаева М.А., Матвеева В.А., Сверчков И.П.* Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 97-104. DOI: 10.31897/PMI.2022.5

48. *Смирнов Ю.Д., Сучкова М.В.* Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3 (79). С. 16-25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25

***Авторы*: Т.Е.Литвинова**, *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-0133-3400* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Д.В.Сучков**, *аспирант, suchkov_dv@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-5813-615x* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0