

СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ

УДК 628.477.6:666.94

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.22874356>

Д. А. Плотников, канд. техн. наук, Д. В. Антонов

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры – филиал
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет», г. Макеевка

КОНЦЕПЦИЯ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА ОТХОДОВ САМОСПАСАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО АКТИВАТОРА ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена возможность вторичного использования регенеративного продукта отходов самоспасателей с химически связанным кислородом для получения щелочного активатора техногенных минеральных материалов. Показано, что продукт на основе супероксида калия после контролируемой водной обработки образует многокомпонентную щелочную систему, содержащую гидроксидные, карбонатные, пероксидные и кальцийсодержащие соединения. Обосновано, что такой продукт не может рассматриваться как прямой заменитель товарного КОН, а целесообразен в качестве компонента комбинированного активатора.

В качестве наиболее перспективной предложена система на основе доменного гранулированного шлака, золошлаковых отходов и вторичного калийсодержащего активатора. Разработана концептуальная технологическая схема способа, включающая сортировку самоспасателей по состоянию, извлечение регенеративного продукта, его контролируемое преобразование, нормирование состава и последующее использование при получении закладочных, заполняющих и укрепляющих материалов технического назначения.

Ключевые слова: отходы самоспасателей, супероксид калия, регенеративный продукт, щелочной активатор, техногенное минеральное сырьё, доменный гранулированный шлак, золошлаковые отходы, ресурсосбережение

Для цитирования: Плотников, Д. А. Концепция вторичного использования регенеративного продукта отходов самоспасателей для получения щелочного активатора техногенных минеральных материалов / Д. А. Плотников, Д. В. Антонов // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Road Institute. – 2026. – № 2(57). – С. 18–29. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22874356>.

Введение

Самоспасатель представляет собой средство индивидуальной защиты органов дыхания, предназначенное для самостоятельного выхода человека из зоны с непригодной для дыхания атмосферой. В зависимости от принципа действия их делят на фильтрующие и изолирующие. Среди изолирующих аппаратов особое место занимают самоспасатели с химически связанным кислородом – они широко применяются при подземных горных работах, в тоннелях и на других объектах, где авария может привести к резкому снижению содержания кислорода или появлению токсичных газов [1]. Принцип его работы основан на регенерации выдыхаемого воздуха в замкнутом контуре. В большинстве современных моделей в качестве источника кислорода используется регенеративный продукт на базе супероксида калия. После окончания срока службы, применения или повреждения аппарат подлежит списанию и не может больше использоваться по прямому назначению. Однако утрата защитных свойств вовсе не означает полной потери химической активности и ресурсной ценности содержащегося в нем регенеративного продукта.

Ранее возможность вторичного использования таких продуктов рассматривалась в основном для реагентной обработки шахтных вод [2], но высокое содержание соединений

калия и кальция открывает и другие перспективы. Одним из перспективных направлений может стать получение щелочного компонента для активации техногенного минерального сырья. Щелочно-активированные материалы образуются при взаимодействии алюмосиликатных и кальций-алюмосиликатных компонентов со щелочными реагентами. В качестве сырья часто выступают доменные шлаки, золы и другие промышленные отходы, а в качестве активаторов – гидроксиды, карбонаты и силикаты натрия или калия [3]. Поскольку производство товарных щелочных активаторов требует значительных затрат первичного сырья и энергии, использование вторичных источников рассматривается как перспективное направление ресурсосберегающих технологий в строительстве [4].

Конечно, регенеративный продукт списанных самоспасателей нельзя напрямую считать готовым заменителем гидроксида калия. При его контролируемом взаимодействии с водой образуется система переменного состава, включающая гидроксиды, карбонаты, пероксидные и кальциевые соединения. Следовательно, научный и практический интерес представляет именно возможность получения из него вторичного щелочного компонента с прогнозируемыми характеристиками для последующего использования в активирующих системах.

Предлагаемый подход актуален тем, что позволяет одновременно решать две задачи: перерабатывать химически активный специфический отход и вовлекать в оборот значительно большие объёмы техногенного минерального сырья. На начальном этапе наиболее целесообразным выглядит применение такого активатора в шлаковых и шлако-зольных материалах технического назначения, где допускается использование сырья переменного состава.

Цель исследования

Обосновать применение регенеративного продукта отходов самоспасателей с химически связанным кислородом для получения щелочного активатора техногенных минеральных материалов.

Основной материал исследования

Наиболее ценным и одновременно наиболее проблемным компонентом отходов самоспасателей с химически связанным кислородом является регенеративный продукт. Это не индивидуальное вещество, а целая композиция, состав которой зависит от конкретной модели аппарата и технологии его изготовления. Так, в продукте ОКЧ-3 содержится 85–88 % супероксида калия, 10–15 % оксида кальция и 1,5–2 % хризотиловой добавки [2]. Основную массу составляет высокоактивное соединение калия, в то время как остальные компоненты выполняют вспомогательную роль, но впоследствии тоже влияют на свойства образующегося отхода. Важно отметить, что приведенные цифры относятся к конкретной марке и не могут автоматически распространяться на все типы самоспасателей.

В процессе эксплуатации супероксид калия активно взаимодействует с влагой и диоксидом углерода выдыхаемого воздуха. Реакция идет с выделением кислорода и тепла, при этом CO_2 связывается внутри патрона [2, 5]. Самоспасатель рассчитан на однократное использование: после вскрытия он уже не подлежит повторному применению. При этом изменение состояния регенеративного продукта может происходить не только во время работы. Даже простое нарушение герметичности корпуса приводит к постепенному проникновению влаги и деградации химического состава – этот фактор производители учитывают при контроле исправности изделий [5].

В итоге одна и та же модель самоспасателя после утраты защитных свойств может давать отходы с существенно разным химическим составом и остаточной реакционной способностью. Для выбора оптимального способа переработки целесообразно разделить отходы самоспасателей на три основные группы:

1. Неиспользованные аппараты с истекшим сроком хранения или эксплуатации, сохранившие герметичность. В них ожидаемо максимальное содержание непрореагировавшего супероксида калия.

2. Частично сработавшие аппараты, где регенеративный продукт уже содержит как исходные вещества, так и продукты их взаимодействия с влагой и CO_2 .

3. Полностью использованные, повреждённые или разгерметизированные самоспасатели. Состав здесь наиболее неоднородный и зависит от длительности и условий контакта с окружающей средой.

Такое разделение носит в первую очередь технологический характер и в дальнейшем требует подтверждения результатами химического и фазового анализа.

Изменение состояния регенеративного продукта в течение жизненного цикла самоспасателя схематично представлено на рисунке 1. Схема показывает, что объектом переработки является не однородный материал с постоянными свойствами, а несколько разных потоков отходов, нуждающихся в предварительной идентификации и сортировке. Смешивание их «вслепую» до определения остаточного содержания активных компонентов может привести к нестабильным характеристикам получаемого щелочного раствора, в связи с этим сортировка самоспасателей по их состоянию должна стать первым обязательным этапом предлагаемого ресурсосберегающего способа.

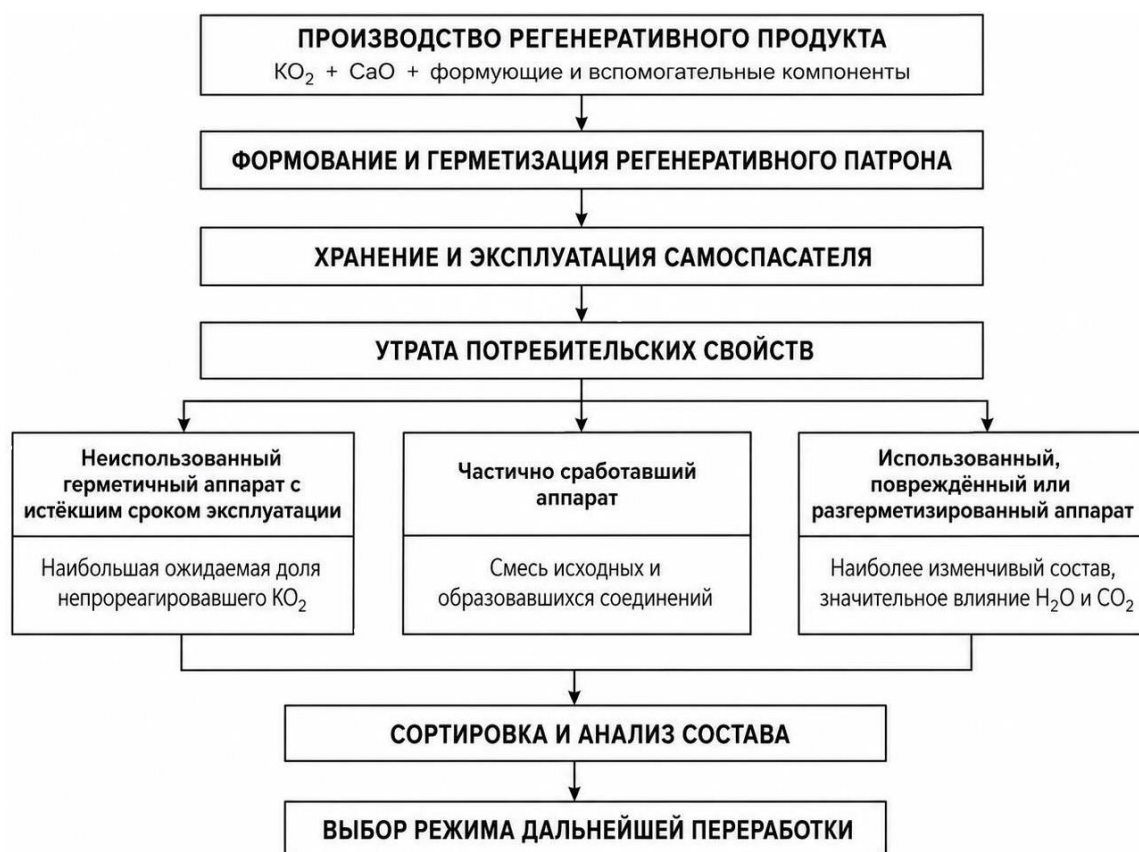


Рисунок 1 – Изменение состояния регенеративного продукта в течение жизненного цикла

Возможность получения щелочного активатора из регенеративного продукта самоспасателей определяется в первую очередь химическими свойствами супероксида калия и оксида кальция, которые составляют его основу. Оба соединения активно взаимодействуют с водой, но характер и скорость этих реакций существенно различаются.

При гидролизе супероксида калия образуются гидроксид калия, пероксид водорода и кислород. Обе реакции экзотермические, а превращение супероксида калия сопровождается еще и газовыделением, следовательно, простое гашение регенеративного продукта водой неприемлемо. Гашение водой необходимо проводить в контролируемых условиях: с дозированной подачей компонентов, отводом тепла и безопасным удалением выделяющегося кислорода.

Главный интерес представляет образующийся в отходе гидроксид калия – именно он обладает высокой активирующей способностью по отношению к минеральному сырью. Исследования растворов, полученных из отходов продукта ОКЧ-3, действительно подтверждают формирование сильнощелочной среды и присутствие КОН в жидкой фазе. Однако важно понимать, что гидроксид калия может частично образовываться еще на стадии хранения – за счёт постепенного взаимодействия KO_2 с влагой воздуха, поэтому даже герметично хранившийся продукт нельзя считать химически однородным: соотношение исходного супероксида и продуктов его превращения нужно определять для каждой конкретной партии [6].

Состав системы будет меняться и при контакте с диоксидом углерода воздуха. Гидроксид калия постепенно переходит в карбонат, а при определённых условиях – в гидрокарбонат. Эти превращения снижают содержание свободной щёлочи, но не обязательно полностью лишают продукт активирующих свойств. Если гидроксиды калия – классические активаторы, то карбонаты и соединения кальция тоже могут участвовать в активации высококальциевого сырья, хотя механизм и кинетика процесса будут иными.

В итоге после водной обработки мы получаем неоднородную многокомпонентную систему: калийсодержащую жидкую фазу (КОН, K_2CO_3 , KHCO_3 , остаточные пероксиды) и твёрдый остаток, содержащий соединения кальция, хризотил и другие примеси. Полное отделение кальцийсодержащей части не всегда целесообразно – в ряде случаев эти соединения могут полезно участвовать в формировании вязущих фаз.

Схема химических превращений компонентов регенеративного продукта представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема химических превращений компонентов регенеративного продукта при получении вторичного щелочного активатора

Щелочная активация основана на взаимодействии алюмосиликатного или кальций-алюмосиликатного сырья со щелочными соединениями. В сильнощелочной среде (высокое

значение pH) происходит частичное растворение исходных минеральных фаз с последующим образованием новых связующих соединений. В качестве активаторов традиционно используют гидроксиды, карбонаты и растворимые силикаты натрия или калия.

Продукт переработки отходов самоспасателей, разумеется, нельзя считать прямым аналогом товарного гидроксида калия – его практическая ценность заключается в возможности использования гидроксидных и карбонатных соединений калия в качестве щелочного компонента активирующей системы. Присутствующие соединения кальция также способны участвовать в процессах структурообразования. При необходимости такой вторичный продукт может применяться совместно с жидким стеклом, замещая не весь активатор, а именно наиболее ресурсоёмкую – щелочную – его часть.

Возможность применения калийных активаторов уже подтверждена для материалов на основе доменного гранулированного шлака, золы-уноса и их композиций [7, 8]. Эффективность активации при этом зависит не только от концентрации щелочи, но и от содержания кальция, доли аморфной фазы и условий твердения, поэтому в качестве модельного сырья для первоначальной проверки гипотезы наиболее подходящим выглядит доменный гранулированный шлак – он обладает достаточно высокой реакционной способностью и может твердеть при щелочной активации в нормальных температурных условиях.

С точки зрения регионального применения интерес представляют золошлаковые отходы Зуевской ТЭС. В исследованной смеси содержание SiO_2 составило 53,44 %, Al_2O_3 – 23,40 %, Fe_2O_3 – 8,31 %, CaO – 1,66 % [9]. Суммарная доля оксидов кремния, алюминия и железа достигает 85,15 %, что позволяет рассматривать этот материал как вполне подходящее алюмосиликатное сырьё. При этом низкое содержание кальция ограничивает его самостоятельное твердение в нормальных условиях.

В работе [9] при совместном использовании золошлаковой смеси и пыли цементных печей удалось заменить до 70 % портландцемента, прочность образцов достигала не менее 18 МПа через 2 суток и 45 МПа через 28 суток. Авторы связывают такой результат в том числе с дополнительной щелочной активацией.

Сравнительная характеристика традиционных щелочных активаторов и активаторов, получаемых из отходов, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная оценка щелочных активаторов

Вид активатора	Преимущества	Ограничения	Возможность замещения
NaOH	Высокая активность, доступность	Коррозионность, использование первичного сырья	Частичная
KOH	Высокая растворимость и активность	Более высокая стоимость	Наиболее близкий аналог
Растворимые силикаты	Источник щёлочи и кремнезёма	Энергоёмкость производства	Совместное применение
Карбонаты	Более безопасное обращение	Замедленное твердение	Возможна замена карбонатной части
Активаторы из отходов самоспасателей	Снижение расхода первичного сырья	Переменный состав	Требуется подготовки и нормирования

Наиболее обоснованной для дальнейших исследований представляется комбинированная система: *доменный шлак + золошлаковые отходы + вторичный калийсодержащий активатор*.

В ней шлак выступает основным реакционноспособным компонентом, золошлаковая смесь – алюмосиликатным сырьём и наполнителем, а регенеративный продукт отходов

самоспасателей – источником щелочных соединений. Отходы угледобычи и углеобогащения также могут быть вовлечены в такую систему, однако из-за относительно низкой реакционной способности их целесообразнее использовать преимущественно как заполнитель или минеральную основу закладочных материалов, то есть на начальном этапе вторичный активатор разумнее применять не в конструкционных бетонах, а в закладочных, заполняющих и укрепляющих материалах технического назначения. Требования к прочности у них ниже, зато объём вовлекаемых промышленных отходов может быть существенно больше.

Выбор минерального сырья для активации должен учитывать сразу несколько факторов: его реакционную способность, объёмы образования, сложность подготовки и предполагаемую область конечного применения. Сравнительная характеристика основных видов техногенного сырья приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка пригодности техногенного минерального сырья для применения вторичного щелочного активатора

Вид сырья	Реакционная способность	Необходимая подготовка	Предполагаемая роль	Область применения
Доменный гранулированный шлак	Высокая	Измельчение при необходимости	Основной вяжущий компонент	Закладочные и заполняющие материалы
Золошлаковая смесь	Средняя	Сушка, рассев, возможное измельчение	Алюмосиликатный компонент и наполнитель	Шлако-золевые смеси
Зола-унос	Средняя	Контроль дисперсности и потерь при прокаливании	Дополнительный алюмосиликатный компонент	Вяжущие и строительные смеси
Отходы углеобогащения	Низкая–средняя	Измельчение, введение активного компонента	Минеральная основа или заполнитель	Закладочные материалы
Отвальная горная порода	Низкая	Дробление и измельчение	Заполнитель	Основания, заполнение пустот
Пыль цементных печей	Переменная, часто высокая	Химический анализ и дозирование	Щелочной и кальцийсодержащий компонент	Многокомпонентные вяжущие

Из таблицы 2 видно, что наиболее предсказуемым и удобным в работе остается доменный гранулированный шлак. Однако больший экологический и ресурсосберегающий эффект можно получить при его комбинировании с золошлаковыми отходами и отходами угольной промышленности. В такой системе шлак обеспечивает необходимое твердение, а менее активные компоненты выступают в роли наполнителя или минеральной основы.

Переработка отходов самоспасателей должна начинаться с обязательной сортировки по состоянию. Герметичные аппараты с истекшим сроком, частично сработавшие и полностью повреждённые изделия могут существенно различаться по содержанию непрореагиро-

вавшего супероксида калия и продуктов его превращения, их смешивание без предварительного анализа почти наверняка приведёт к нестабильности состава получаемого активатора.

Далее аппараты разбирают с разделением металлических, полимерных и химических компонентов, после этого выделенный регенеративный продукт подвергают контролируемой водной обработке с регулированием температуры и безопасным отводом газовой выделения. Полученную систему разделяют на жидкую и твёрдую фазы. Калийсодержащая жидкая фаза после определения щелочности, содержания карбонатов и остаточных пероксидных соединений может использоваться как компонент активирующей системы. Возможность применения твёрдого остатка (содержащего соединения кальция и вспомогательные добавки) требует отдельной оценки в зависимости от состава активируемого сырья.

На следующей стадии вторичный активатор смешивают с доменным шлаком, золошлаковыми отходами и минеральным заполнителем, а при необходимости состав корректируют добавлением жидкого стекла или другого источника растворимого кремнезёма.

В целом технологическая цепочка выстраивается так:

отходы самоспасателей → сортировка по состоянию → разборка и извлечение регенеративного продукта → контролируемая водная обработка → разделение фаз → нормирование характеристик активатора → смешивание с техногенным сырьём → получение материала технического назначения.

Главный ресурсосберегающий эффект такого подхода заключается в том, что относительно небольшой объём химически активного отхода (регенеративного продукта самоспасателей) позволяет вовлечь в хозяйственный оборот значительно большую массу золошлакового, металлургического или горнопромышленного сырья. Концептуальная схема материальных потоков при переработке отходов самоспасателей и получении материала технического назначения представлена на рисунке 3.

Предлагаемый способ, безусловно, имеет ряд ограничений, которые важно учитывать ещё до выхода на практическое применение. Главная сложность связана с переменным составом регенеративного продукта. Его свойства сильно зависят от типа самоспасателя, срока и условий хранения, герметичности корпуса и степени срабатывания. Таким образом одинаковый режим водной обработки невозможно применять ко всем отходам без предварительной сортировки и анализа каждой партии.

Дополнительные трудности могут создать остаточные пероксидные соединения. Они могут вызывать неконтролируемое газовыделение, влиять на пористость и стабильность получаемого раствора. Не менее значимы процессы карбонизации: свободный КОН постепенно переходит в карбонаты калия. Это конечно не исключает возможность активации минерального сырья, но может повлиять на кинетику и механизм структурообразования.

Отдельного внимания и контроля требуют нерастворимые и волокнистые компоненты (в частности, хризотилловая добавка). Кроме того, необходимо изучить возможное выщелачивание калия и других компонентов из уже затвердевшего материала в процессе эксплуатации.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на решение нескольких ключевых задач. Во-первых, определить химический и фазовый состав отходов разных групп. Во-вторых, отработать оптимальные условия гашения водой, оценить щелочность, стабильность активатора и содержание пероксидных, карбонатных и кальцийсодержащих соединений. После этого необходимо подобрать составы на основе доменного шлака и золошлаковых отходов, сравнить их с контрольными системами на товарном КОН и всесторонне изучить прочность, водостойкость, пористость и выщелачивание компонентов.

Основная задача следующего этапа заключается не просто в подтверждении самой возможности щелочной активации с использованием отходов самоспасателей, а в установлении чётких условий, при которых получаемый вторичный активатор приобретает воспроизводимые и контролируемые свойства.

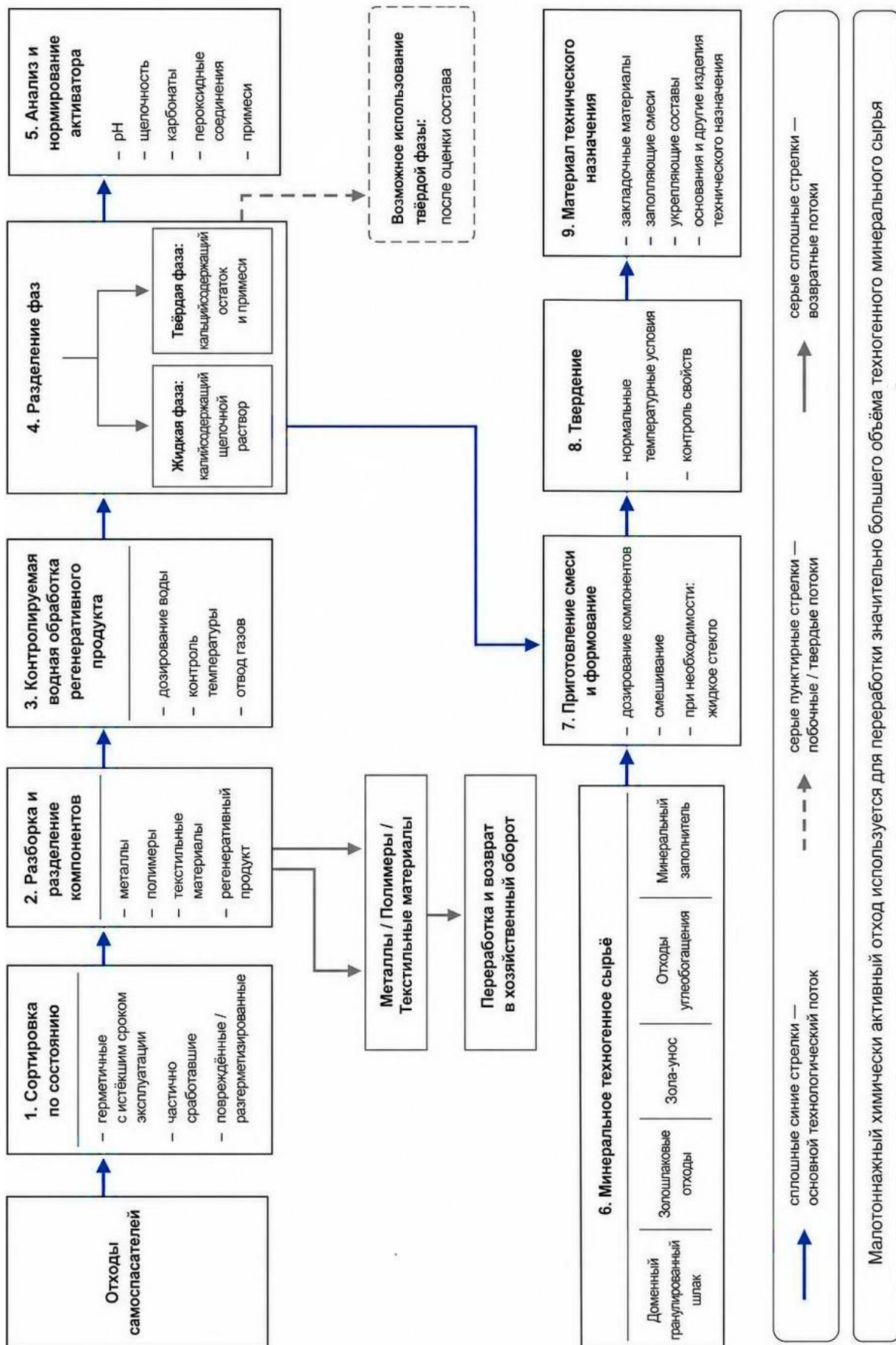


Рисунок 3 – Концептуальная схема переработки отходов самоспасателей и получения материалов технического назначения

Выводы

1. В работе обоснована возможность использования регенеративного продукта отходов самоспасателей с химически связанным кислородом в качестве вторичного сырья для получения калийсодержащего щелочного активатора. Для продукта ОКЧ-3 доля супероксида калия составляет 85–88 %, что свидетельствует о высоком щелочном потенциале данного вида отхода.

2. Установлено, что переработанный продукт не может рассматриваться как прямой аналог товарного гидроксида калия. В его составе одновременно присутствуют гидроксидные, карбонатные, пероксидные и кальцийсодержащие соединения. Поэтому технологический процесс должен обязательно включать как минимум четыре ключевые стадии: сортировку отходов по состоянию, контролируемую водную обработку, разделение фаз и нормирование характеристик получаемого активатора.

3. Наиболее рациональной признана комбинированная система «доменный гранулированный шлак – золошлаковые отходы – вторичный калийсодержащий активатор». Перспективность золошлаковой смеси Зуевской ТЭС подтверждается высоким содержанием оксидов кремния (53,44 %) и алюминия (23,40 %); суммарная доля SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 достигает 85,15 %, что позволяет эффективно использовать данный материал в качестве алюмосиликатного компонента.

4. Определено, что вторичный продукт целесообразнее применять для частичного замещения щелочной составляющей комбинированного активатора, а не для полного отказа от товарных реагентов. При необходимости силикатный модуль системы может корректироваться путем введения жидкого стекла или другого источника растворимого кремнезёма.

5. Разработана концептуальная схема ресурсосберегающего способа, который объединяет переработку двух разных потоков отходов – регенеративного продукта самоспасателей и техногенного минерального сырья. В качестве первоочередной области применения выбраны закладочные, заполняющие и укрепляющие материалы технического назначения. Экспериментальная проверка предлагаемого подхода должна проводиться не менее чем на трёх группах отходов самоспасателей: герметичных с истекшим сроком эксплуатации, частично сработавших и разгерметизированных.

Список литературы

1. ГОСТ 12.4.292–2023. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Самоспасатели изолирующие на химически связанном или со сжатым кислородом. Технические требования. Методы испытаний. Маркировка. Правила отбора образцов : межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 31 марта 2023 г. № 160-П : дата введения 2023-06-01 : взамен ГОСТ 12.4.292–2015 / разработан Акционерным обществом «Корпорация «Росхимзащита». – Москва : Российский институт стандартизации, 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200196424> (дата обращения: 10.07.2026). – Текст : электронный.
2. Высоцкий, С. П. Использование отходов самоспасателей на химически связанном кислороде для снижения карбонатной жесткости шахтной воды / С. П. Высоцкий, Д. А. Плотников, В. В. Мамаев. – DOI 10.18799/24131830/2021/07/3281. – Текст : электронный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 7. – С. 172–181. – URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/download/3281/2517/3204> (дата обращения: 10.07.2026).
3. Provis, J. L. Alkali-activated materials / J. L. Provis. – DOI 10.1016/j.cemconres.2017.02.009. – Текст : электронный // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 114. – P. 40–48. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009> (дата обращения: 10.07.2026).
4. Alnahhal, M. F. Waste-derived activators for alkali-activated materials: a review / M. F. Alnahhal, T. Kim, A. Hajimohammadi. – DOI 10.1016/j.cemconcomp.2021.103980. – Текст : электронный // Cement and Concrete Composites. – 2021. – Vol. 118. – Art. 103980. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103980> (дата обращения: 10.07.2026).
5. Dräger Oxy SR : instructions for use. – Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2020. – URL: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/oxy-ifu-9300335-en.pdf> (дата обращения: 10.07.2026). – Текст : электронный.

6. Tsaplev, Y. B. Potassium superoxide as an intricate source of superoxide anion. Elucidating the composition of its samples in dimethyl sulfoxide by reactions with (5,10,15,20-tetraphenylporphinato)manganese(III) chloride and curcumin / Y. B. Tsaplev, A. V. Trofimov. – DOI 10.1016/j.saa.2021.119425. – Текст : электронный // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2021. – Vol. 251. – Art. 119425. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119425> (дата обращения: 10.07.2026).
7. Alkali-Activated Slag Paste with Different Mixing Water: A Comparison Study of Early-Age Paste Using Electrical Resistivity / Y. Jun, Y. H. Bae, T. Y. Shin, J. H. Kim, H. J. Yim. – DOI 10.3390/ma13112447. – Текст : электронный // Materials. – 2020. – Vol. 13, № 11. – Art. 2447. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma13112447> (дата обращения: 10.07.2026).
8. Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer / J. Cai, X. Li, J. Tan, B. Vandevyvere. – DOI 10.1016/j.job.2020.101307. – Текст : электронный // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 30. – Art. 101307. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101307> (дата обращения: 10.07.2026).
9. Лахтарина, С. В. Композиционные вяжущие на основе отходов промышленности Донбасса / С. В. Лахтарина, Н. М. Зайченко, Н. Н. Лахтарина. – Текст : электронный // Строительство и техногенная безопасность. – 2026. – № 40(92). – С. 15–24. – URL: <https://stroyjournal-asa.ru/index.php/asa/article/view/331> (дата обращения: 10.07.2026).

References

1. GOST 12.4.292–2023. Occupational Safety Standards System. Personal Respiratory Protective Equipment. Self-Contained Oxygen Rescuers. Technical Requirements. Test Methods. Marking. Sampling Rules. Interstate standard. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification on March 31, 2023. No. 160-P. Effective date : June 1, 2023. Replaces GOST 12.4.292–2015; developed by Roskhimzashchita Corporation. Moscow : Russian Institute of Standardization, 2023. (In Russ.) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200196424>
2. Vysotskii S. P. Using Waste from Chemically Bound Oxygen Self-Rescuers to Reduce the Carbonate Hardness of Mine Water. S. P. Vysotskii, D. A. Plotnikov, V. V. Mamaev. DOI 10.18799/24131830/2021/07/3281. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering]. 2021. Vol. 332, № 7. Pp. 172–181. (In Russ.) URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/download/3281/2517/3204>
3. Provis J. L. Alkali-Activated Materials. DOI 10.1016/j.cemconres.2017.02.009. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 40–48. (In Eng.) URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
4. Alnahhal M. F. Waste-Derived Activators for Alkali-Activated Materials: A Review. M. F. Alnahhal, T. Kim, A. Hajimohammadi. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2021.103980. Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. Art. 103980. (In Eng.) URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103980>
5. Dräger Oxy SR : instructions for use. Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2020. (In Eng.) URL: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/oxy-ifu-9300335-en.pdf>
6. Tsaplev Y. B. Potassium Superoxide as an Intricate Source of Superoxide Anion. Elucidating the Composition of Its Samples in Dimethyl Sulfoxide by Reactions with (5,10,15,20-tetraphenylporphinato)manganese(III) chloride and curcumin. Y. B. Tsaplev, A. V. Trofimov. DOI 10.1016/j.saa.2021.119425. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. Vol. 251. Art. 119425. (In Eng.) URL: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119425>
7. Alkali-Activated Slag Paste with Different Mixing Water: A Comparison Study of Early-Age Paste Using Electrical Resistivity, Y. Jun, Y. H. Bae, T. Y. Shin, J. H. Kim, H. J. Yim. DOI 10.3390/ma13112447. Materials. 2020. Vol. 13, № 11. Art. 2447. (In Eng.) URL: <https://doi.org/10.3390/ma13112447>
8. Thermal and Compressive Behaviors of Fly Ash and Metakaolin-Based Geopolymer. J. Cai, X. Li, J. Tan, B. Vandevyvere. DOI 10.1016/j.job.2020.101307. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. Art. 101307. (In Eng.) URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101307>
9. Lakhtarina S. V. Composite Binders Based on Industrial Waste from Donbass. S. V. Lakhtarina, N. M. Zaichenko, N. N. Lakhtarina. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. [Construction and Technogenic Safety]. 2026. № 40(92). Pp. 15–24. (In Russ.) URL: <https://stroyjournal-asa.ru/index.php/asa/article/view/331>

Статья поступила 13.07.2026

© Д. А. Плотников, Д. В. Антонов, 2026

Рецензент: В. В. Губа, канд. техн. наук, доц.,

Автомобильно-дорожный институт

(филиал) ДонНТУ в. г. Горловка

Д. А. Плотников, Д. В. Антонов

Концепция вторичного использования регенеративного продукта отходов самоспасателей для получения щелочного активатора техногенных минеральных материалов

Исследована возможность вторичного использования регенеративного продукта отходов самоспасателей с химически связанным кислородом для получения щелочного активатора техногенных минеральных материалов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения объёмов опасных промышленных отходов и вовлечения их ресурсного потенциала в переработку золошлаковых, металлургических и горнопромышленных материалов.

Показано, что регенеративный продукт на основе супероксида калия после контролируемой водной обработки образует многокомпонентную щелочную систему, включающую гидроксидные, карбонатные, пероксидные и кальцийсодержащие соединения. Установлено, что получаемый продукт не является прямым аналогом товарного КОН и должен рассматриваться как компонент комбинированного активатора. Для продукта ОКЧ-3 содержание супероксида калия составляет 85–88 %, оксида кальция – 10–15 %, что подтверждает высокий щелочной потенциал данного вида отхода.

Обосновано применение такого активатора в системе «доменный гранулированный шлак – золошлаковые отходы – вторичный калийсодержащий активатор». В качестве перспективного алюмосиликатного компонента рассмотрена золошлаковая смесь Зуевской ТЭС с содержанием 53,44 % SiO_2 , 23,40 % Al_2O_3 и 8,31 % Fe_2O_3 (суммарная доля этих оксидов достигает 85,15 %).

Разработана концептуальная схема ресурсосберегающего способа, включающая сортировку отходов самоспасателей по состоянию, контролируемую разборку, извлечение регенеративного продукта, водную обработку с регулированием температуры и газовой выделением, разделение фаз, анализ и нормирование щелочного компонента, а также его последующее смешивание с техногенным минеральным сырьём.

Определены основные ограничения предлагаемого подхода: переменный состав отхода, наличие остаточных пероксидных соединений, процессы карбонизации, присутствие нерастворимых и волокнистых примесей, а также возможное выщелачивание калия из затвердевшего материала. Приоритетной областью применения выбраны закладочные, заполняющие и укрепляющие материалы технического назначения.

Полученные результаты закладывают основу для дальнейшей экспериментальной проверки состава активатора и эксплуатационных свойств материалов на его основе.

ОТХОДЫ САМОСПАСАТЕЛЕЙ, СУПЕРОКСИД КАЛИЯ, РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПРОДУКТ, ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАТОР, ТЕХНОГЕННОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЁ, ДОМЕННЫЙ ГРАНУЛИРОВАННЫЙ ШЛАК, ЗОЛОШЛАКОВЫЕ ОТХОДЫ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

D. A. Plotnikov, D. V. Antonov

Concept of Recycling the Regenerative Product of Waste from Self-Rescuers to Produce an Alkaline Activator of Man-Made Mineral Materials

The paper explores the possibility of recycling the regenerative product from expired self-rescuers with chemically bound oxygen as an alkaline activator of man-made mineral materials. The relevance of the study is driven by the need to reduce the volume of hazardous industrial waste and to involve its resource potential in the processing of fly ash, metallurgical, and mining industry wastes.

It is shown that the regenerative product forms a multicomponent alkaline system containing hydroxide, carbonate, peroxide, and calcium-containing compounds based on potassium superoxide after controlled aqueous treatment. It is established that the obtained product is not a direct analogue of commercial KOH and should be considered as a component of the combined activator. For the OKCh-3 product, the content of potassium superoxide is 85–88 % and calcium oxide is 10–15 %, confirming the high alkaline potential of this type of waste.

The use of such an activator in the system “granulated blast furnace slag – fly ash and slag waste – secondary potassium-containing activator” is substantiated. The fly ash and slag mixture from the Zuevskaya TPP is considered as a promising aluminosilicate component, containing 53,44 % SiO_2 , 23,40 % Al_2O_3 , and 8,31 % Fe_2O_3 (the total share of these oxides reaches 85,15 %).

The conceptual scheme of the resource-saving method is developed, which includes sorting of the self-rescuer waste by condition, controlled disassembly, extraction of the regenerative product, aqueous treatment with temperature and gas evolution control, phase separation, analysis and normalization of the alkaline component, and its subsequent mixing with man-made mineral materials.

The main limitations of the proposed approach are identified: the variable composition of the waste, the presence of residual peroxide compounds, carbonation processes, the presence of insoluble and fibrous impurities, and possible leaching of potassium from the hardened material. The priority areas of application are backfill, filling, and strengthening materials for technical purposes.

The obtained results form the basis for further experimental verification of the activator composition and the performance properties of materials based on it.

SELF-RESCUER WASTE, POTASSIUM SUPEROXIDE, REGENERATIVE PRODUCT, ALKALINE ACTIVATOR, MAN-MADE MINERAL RAW MATERIALS, BLAST FURNACE GRANULAR SLAG, ASH AND SLAG WASTE, RESOURCE CONSERVATION

Сведения об авторах:

Плотников Денис Александрович

Кандидат технических наук,

доцент кафедры «Техносферная безопасность» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, Российская федерация,

SPIN-код РИНЦ: 7111-2362
 ORCID: 0009-0007-3024-5091
 AuthorID: 898528
 Scopus ID: 57226775938
 Телефон: +7 949 403-53-70
 Эл. почта: d.a.plotnikov@donnasa.ru

Антонов Дмитрий Владимирович

Магистрант Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, Российская Федерация,

ORCID: 0009-0002-3135-017X
 Телефон: +7 949 625-58-66
 Эл. почта: antonov.d.v-zizosm-9a@donnasa.ru

Authors' information:

Plotnikov Denis Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Chair “Technological Security” of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – Branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”, Makeyevka, DPR, Russian Federation,

RSCI SPIN: 7111-2362
 ORCID: 0009-0007-3024-5091
 AuthorID: 898528
 Scopus ID: 57226775938
 Phone: +7 949 403-53-70
 Email: d.a.plotnikov@donnasa.ru

Antonov Dmitrii Vladimirovich

Master's Student of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture – Branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”, Makeyevka, DPR, Russian Federation,

ORCID: 0009-0002-3135-017X
 Phone: +7 949 625-58-66
 Email: antonov.d.v-zizosm-9a@donnasa.ru