

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35

Алфимова Н.И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

E-mail:alfimovan@mail.ru

ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ ПРИРОДНОМУ ГИПСОВОМУ СЫРЬЮ

Аннотация. Изделия на основе гипса широко востребованы на рынке строительных материалов, что обусловлено целым рядом их положительных качеств. Не смотря на большие запасы природного гипсового сырья по всему миру, доступной альтернативой природным ресурсам являются гипсосодержащие отходы различных промышленных предприятий, использование которых отвечает требованиям рационального природопользования и снижения углеродного следа. Целью данного обзора стал анализ многообразия гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий с позиции технологического процесса и объёмов возникновения, структурно-морфологических особенностей и содержащихся примесей, а также состояния и перспектив использования в качестве альтернативы природному гипсовому сырью. В качестве объектов исследования выступали восемь видов наиболее крупнотоннажных гипсосодержащих отходов. В работе проанализирована доля каждого из них в рамках общемировых и внутрироссийских объёмов производства, установлено, что схема образования отходов и масштабность их переработки в РФ, Китае и в мире в целом, имеет существенные отличия. Наиболее представительными в России являются побочные продукты производства минеральных кислот – фосфогипс, фторангидрит/фторгипс, борогипс, вопросам утилизации которых посвящено наибольшее количество публикаций. В тоже время вопросам утилизации десульфурованного гипса из дымовых газов (сульфогипс), который является наиболее «чистым» крупнотоннажным гипсосодержащим отходом, в нашей стране уделяется крайне низкое внимание, а по некоторым отходам (нитрогипс, титановый гипс, соляной гипс) информация практически отсутствует.

Ключевые слова: гипсосодержащие отходы, фосфогипс, десульфурованный гипс из дымовых газов, сульфогипс, фосфогипс, титановый гипс, соляной гипс, фторгипс, фторангидрит, нитрогипс, цитрогипс, борогипс.

Введение. Широкая гамма продуктов на основе гипса – сухие штукатурные и штатлёвочные смеси, гипсокартон, перегородочные блоки, декоративные и акустические изделия, высоко востребованы потребителями. Это связано, с удобством их применения, хорошими эксплуатационными характеристиками – огнестойкостью, отличной шумоизоляцией, пониженной средней плотностью и теплопроводностью, благодаря которым для внутренних работ они оказываются гораздо привлекательнее цементных аналогов [1–3]. С точки зрения привлекательности для производителей – организация и сопровождение процесса их производства отличается меньшими материальными и энергетическими затратами, кроме того, всё более значимым фактором становится степень повышенная степень углеродной нейтральности гипсовых материалов [4, 5].

Несмотря на то, что запасы природного гипса достаточно велики и месторождения его распространены по всему миру – на 2024 год добыча гипса осуществляется в 78 странах мира (рисунок 1) [6]. В тоже время использование гипсосодержащих отходов (ГСО), в качестве альтернативы природному гипсовому камню, имеет

большую перспективу, как с позиции следования общемировому курсу на рациональное природопользование и поиску путей утилизации отходов различных промышленных предприятий, так и с позиции расширения минерально-сырьевой базы ряда регионов, имеющих существенную потребность в этом [5, 7–10].

На сегодняшний день насчитывается свыше пятидесяти разновидностей гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий [5], их запасы имеются во многих странах мира, а ежегодный прирост имеет устойчивую динамику. Однако, как показывает накопленный опыт, не все виды ГСО имеют перспективу применения в качестве альтернативы природному гипсовому сырью.

Прежде, чем говорить о существенном вовлечении того или иного гипсосодержащего отхода в сферу производства необходимо принимать во внимание объёмы его образования и особенности, определяемые технологическим процессом, в ходе которого он образовался (влажность, дисперсность, химический состав, вид и количество примесей и т.д.). Эти факторы обязательно необходимо принимать во внимание

при оценке экономической целесообразности переработки ГСО в товарную продукцию [5, 10].
Целью данного обзора является анализ гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий с позиции технологического процесса образования, объемов образования, структурно-морфологических особенностей и примесей, а также перспектив использования в качестве альтернативы природному гипсовому сырью.

Методология. Данный обзор проводился путем обработки, анализа и общения данных из открытых интернет ресурсов, сайтов промышленных предприятий и литературных источников, в том числе представленных на портале Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU; коллекции классических полнотекстовых журналов издательства Elsevier на платформе ScienceDirect, а также издательства MDPI.

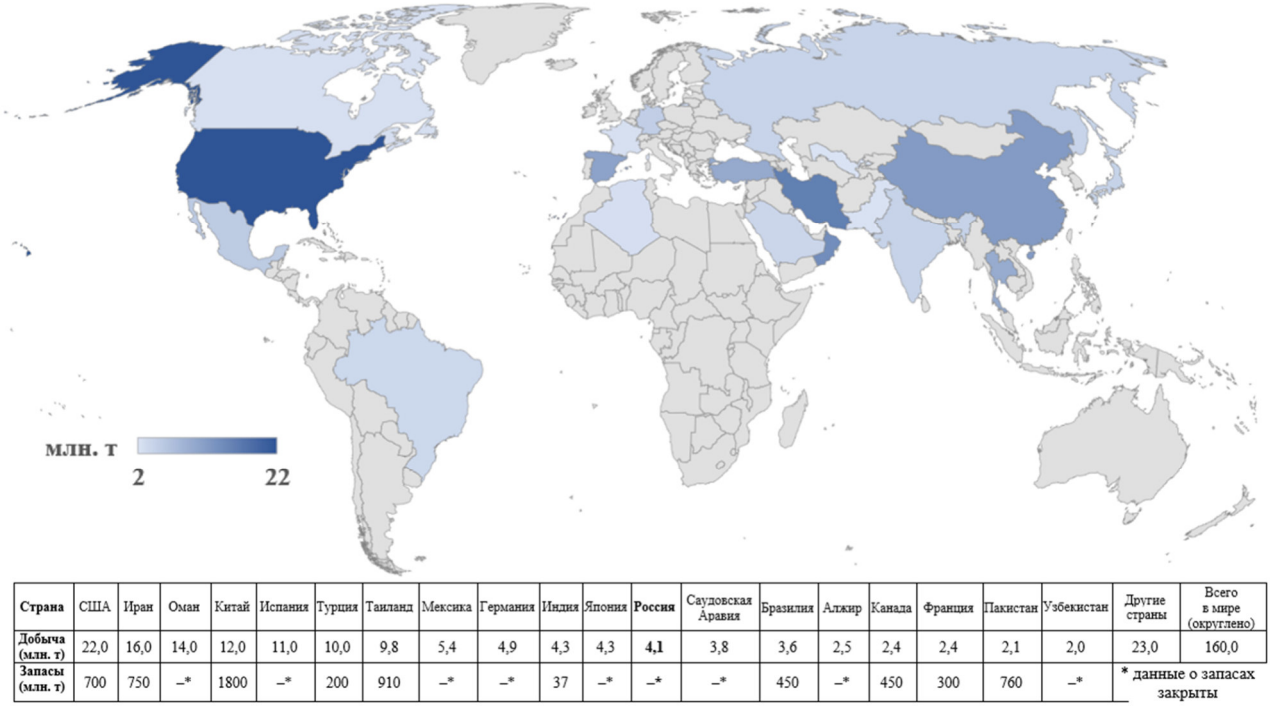


Рис. 1. Добыча и запасы природного гипса по данным на 2024 год в мире.
Карта составлена на основании данных представленных [6]

Основная часть. Тоннажность отдельно взятого гипсосодержащего отхода является одним из основных критериев предопределяющим необходимость и целесообразность его переработки в товарную продукцию, как с экологической, так и экономической точек зрения, поэтому, не смотря на большое количество видов ГСО, только ряд из них имеют достаточные объемы, делающие их объектами исследований научных групп в разных странах.
К сожалению, в открытых источниках отсутствует точная статистика по объемам гипсосодержащих отходов, образующимся в ходе определенных технологических процессов на промышленных предприятиях и их накопленных запасах как в целом по миру, так и в рамках отдельных стран, в том числе РФ. Исключение, наверное, составляет только Китай, объемы ежегодно образующихся в данной стране твердых отходов публикуются в «Государственном ежегодном отчете о твердых отходах в крупных и средних го-

родах Китая» [10] и приводятся рядом исследователей в научных публикациях. Так согласно данным приведенных в источнике [10] в Китае выделяют восемь наиболее тоннажных ГСО, имеющих определенные перспективы утилизации, в том числе в отрасли строительных материалов: десульфурованный гипс из дымовых газов (ДГДГ), фосфогипс (ФГ), титановый гипс (ТГ), соляной гипс (СГ), фторгипс/фторангидрит (ФТГ), нирогипс (НГ), цитрогипс (ЦГ), борогипс (БГ). При этом объемы первых трех существенно превалируют над другими – на их долю приходится 86,8 % от общего объема образующихся ГСО (рис. 2). Согласно данной структуре распределения гипсосодержащих отходов в Китае далее будет проведен анализ каждого из отходов в рамках общемировых объемов производства и производства в России.
Десульфурованный гипс из дымовых газов (в российских источниках чаще встречается термин *сульфогипс, сернистый гипс*), является по-

бочным продуктом сжигания угля, используемого для производства электроэнергии [10–14]. Образуется ДГДГ в ходе взаимодействия дымового газа (SO_2) с абсорбирующей средой в абсорбере или скруббере, и представляет собой шлам с высоким содержанием твердой серы. В зависимости от того отделяются соединения S от абсорбента, или сбрасываются вместе с абсорбентом как отход, Агентство по охране окружающей среды США подразделяет системы очистки газов на нерегенерируемые и регенерируемые, при этом в ряде источников нерегенерируемые дополнительно подразделяют на системы мокрого скруббера и распылительного сухого скруббера,

а также есть более подробные классификации с учетом химических реакций и способов подачи реагентов [12]. Из всего многообразия существующих способов, наиболее распространенным (87 %), благодаря своей признанной эффективности и низкими эксплуатационным расходом, является процесс десульфуризации дымовых газов мокрым известняком (без регенерации). Данный способ основан на сложных кислотно-основных реакциях, протекающих в условиях принудительного или естественного окисления [11–13]. Наиболее подробно данный и другие способы очистки дымовых газов представлены в источнике [12].

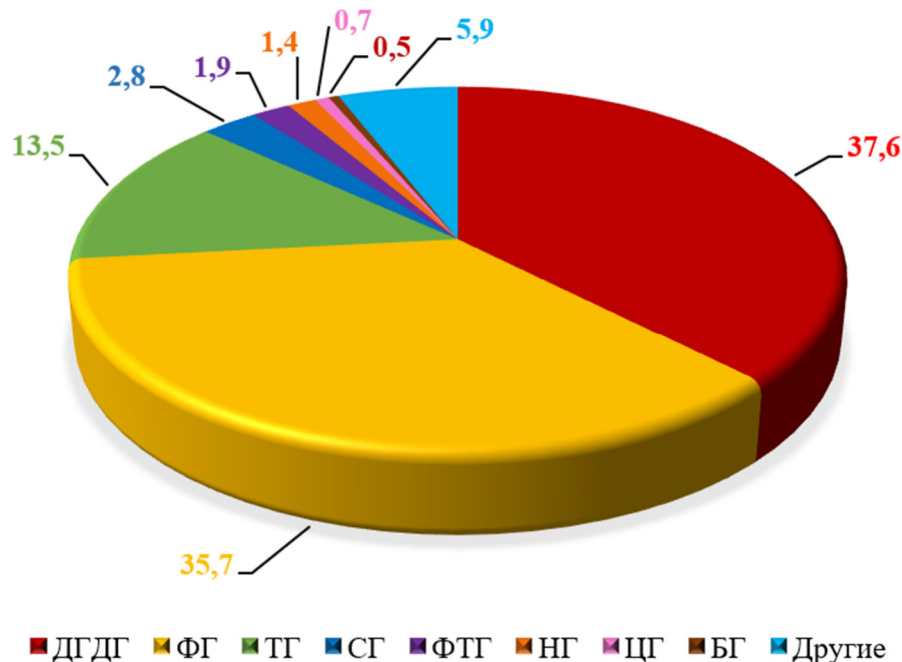


Рис. 2. Пропорциональное распределение восьми типов гипсосодержащих отходов по итогам 2021 г [10]

По оценкам, в 2020 году мировое производство ДГДГ достигло 255 мил т, при этом на страны Азии пришлось – 55 %, Европы – 22 %, Северная Америка – 18 % и 5 % остальной мир [11]. Необходимо отметить, что данных по количеству ДГДГ, образующихся в России в открытых источниках найдено не было, однако авторы [14] отмечают, что только на Гусиноозерской ГРЭС в сутки образуется 163 т сульфогипса, а всего на территории РФ функционирует 79 угольных электростанций.

ДГДГ гипс является одним из наиболее «чистых» гипсосодержащих отходов [14], именно поэтому объемы его переработки в Китае составляют 80 %, а в Германии и Японии и доходят до 100 % [10]. По мнению авторов [13] в России проблеме утилизации сульфогипса не уделяется должного внимания, о чем косвенно свидетельствует крайне низкое количество публикаций, выдаваемых поисковой системой научной элек-

тронной библиотеки eLIBRARY.RU при введении ключевых слов сульфогипс и десульфурованный гипс из дымовых газов.

Фосфогипс – представляет собой твердый отход, образующиеся в процессе производства ортофосфорной кислоты и фосфатных удобрений. Существует два основных способа производства ортофосфорной кислоты из фосфатной руды: «мокрый», при котором для разложения фосфатов используется минеральная кислота (как правило серная) и «сухой», который предполагает нагрев руды в электрической печи до получения фосфора как промежуточного продукта. Наиболее распространенным, в том числе и в РФ, является «мокрый» способ [15–17].

Выделяют пять основных типов фосфатных пород, самыми представительными из которых являются осадочные морские, на их долю приходится 75 % общее мировых запасов. Далее идут магматические, метаморфические и отложения фосфатов, образовавшиеся в результате выветривания, на долю которых суммарно приходится

порядка 15–20 % общемировых запасов. Наименее представительными, с объемом 2–3 %, являются биогенные (скопления гуано птиц и летучих мышей). В России крупнейшим источниками фосфатных пород является Хибинский комплекс из 10 месторождений апатито-нефелиновых руд на Кольском полуострове, на его долю приходится порядка 40 % запасов фосфора в РФ [18, 19]. Вторым по важности, в структуре фосфатной сырьевой базы России, является Ковдорское комплексное месторождение – на его долю приходится 20 % добываемого апатитового концентрата [20].

В зависимости от исходной фосфатной породы и технологического процесса образования фосфогипсы могут иметь существенные отличия друг от друга, как по морфологии частиц, так и по химическому составу, количеству и виду примесей, что существенно усложняет выработку единого подхода к переработке ФГ в товарную продукцию и является одной из основных причин достаточно низкого процента его использования в качестве альтернативы природному сырью. Дополнительным сдерживающим фактором является высокая степень радиоактивности фосфогипсов отдельных производств, которая в основном предопределяется исходной породой. Наибольшим радиоактивным фоном отличаются

фосфогипсы, образовавшиеся при получении ортофосфорной кислоты из осадочных пород месторождений США, Марокко и Туниса. Породы данных месторождений обычно содержат в своем составе повышенное количество урана, тория и продуктов их распада, а также токсичных металлов (кадмий, мышьяк и свинец) [21], что требует разработки дополнительных мер как при хранении фосфогипса, так и при поисках путей его переработки в товарный продукт. В тоже время фосфогипс, полученный из магматических фосфатных пород, например, в Бразилии, обычно содержит более низкие концентрации Cd, As и ртути, но более высокие уровни Y, Zr, Cu и Ba [16, 21].

По статистическим данным ежегодно в мире образуется 200–280 мил т фосфогипса, при этом примерно 58 % ФГ складировается, 28 % – сбрасывается в прибрежные воды и только 14 % – утилизируется [15, 16]. На настоящий момент порядка 3 млрд т (а по ряду источников 8 млрд т) накоплено в отвалах [21–23]. Данные об объемах производства фосфогипса в каждой отдельно взятой стране мира, приведенные в ряде обзоров и научных статьях, посвященных данной проблематике, несколько разнятся [24, 25] (рис. 3) и скорее всего не вполне точно отражают реальную картину.

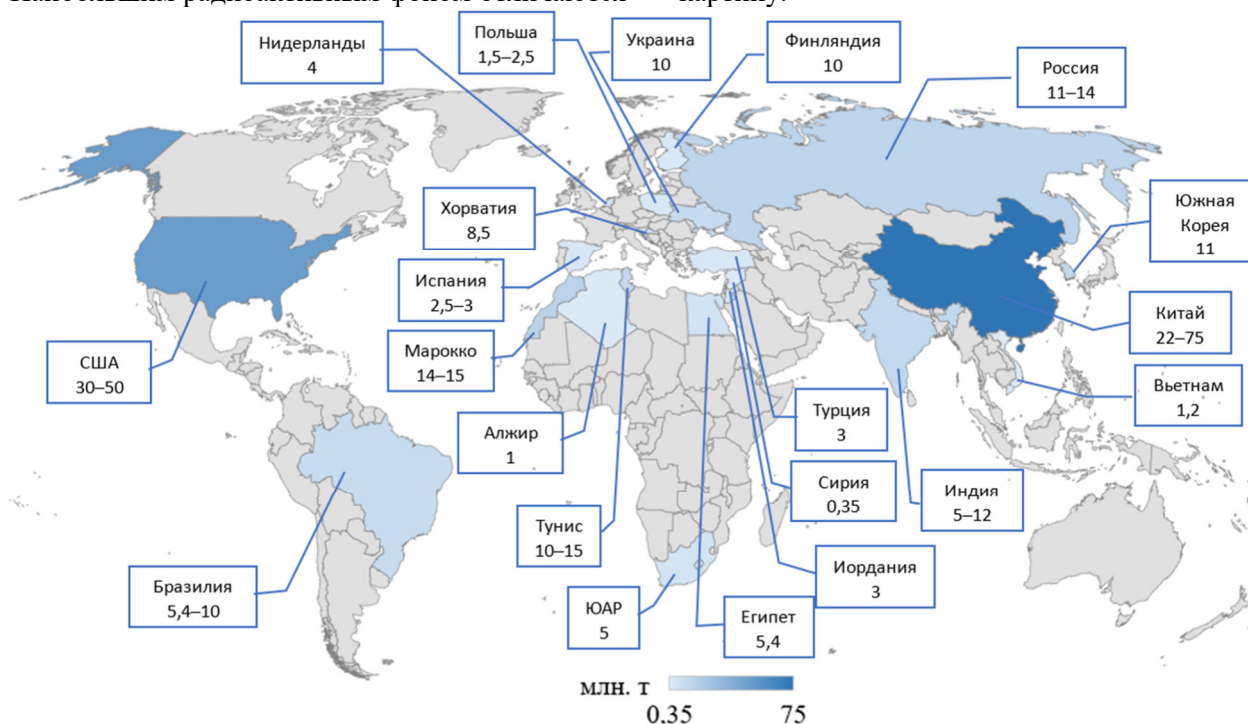


Рис. 3. Годовые объемы фосфогипса, образующиеся в разных странах [24, 25]

Касательно годовых объемов производства ФГ в России, как и в случае с ДГДГ, точная статистика в открытых источниках отсутствует, однако в наша страна имеет значительные мощности по производству фосфатных удобрений и кормовых фосфатов, которые, не смотря на сложившуюся геополитическую обстановку, имеют

стабильную тенденцию к росту. Так по данным, представленным на официальном сайт российской компании «ФосАгро» [26], одного из мировых лидеров отрасли минеральных удобрений, общие объемы фосфорсодержащих удобрений в 2024 году составили 8,9 млн тонн, что на 5,8 %

выше, чем в 2023 г. При этом только за 11 месяцев 2023 года объемы произведенной ортофосфорной кислоты составили 3 млн 63 тысячи тонн. Исходя из того, что при производстве 1 т ортофосфорной кислоты образуется 4,5–5 т ФГ, то объемы фосфогипса в 2023 году только на предприятиях «ФосАгро» превысили 15 млн тонн, что ощутимо превышает данные, представленные в источниках [24, 25] (рис. 3).

Исходя из того, что фосфогипс, в отличие от ДГДГ, может содержать в своем составе более 50 видов примесей [26] большинство из которых (тяжелые металлы, радионуклиды, фтор и т.д.) оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду, проблема поисков его переработки стоит довольно остро по всему миру.

Титановый гипс — отход, образующийся при сернокислом способе производства диоксида титана (TiO_2) после нейтрализации раствора кислот сточных вод известью или шлаком карбида кальция. Отличительной особенностью данного отхода является красновато-желтоватый цвет, предопределяемый присутствием большого количества оксидов железа, высокая влажность и очень мелкие волокнистые кристаллы, которые не позволяют получить гипсовые материалы с высокими физико-механическими характеристиками, поэтому коэффициент переработки данного отхода крайне низок [27–29].

В 2020 году объем производства диоксида титана в мире составил 8,4 млн. тон из них 3,51 пришлось на долю Китая [27, 28]. Если исходить из того, что на 1 тонну TiO_2 может образовываться от 5 до 10 т отхода, то в 2020 году объем титанового гипса в мире составил 42–84 млн т. На территории РФ диоксид титана изготавливается только на одном предприятии — завод «Крымский титан» (г. Армянск), и из-за сравнительно низкой тоннажности, интерес к поиску путей утилизации данного отхода отсутствует.

Соляной гипс образуется как твердые отходы в процессе производства соли или концентрирования морской воды на солеварнях, подразделяется на скважинной, наиболее представительный (50 % от общего объема), морской и озерный. Переработка данного отхода в гипсовые вяжущие или использование его в качестве замедлителя схватывания цемента осложняется присутствием в его составе большого количества соли (до 10 %), тяжёлых металлов и мелким размером частиц [10, 30, 31]. В Российском научном сегменте информации о данном отходе и возможности его утилизации найдено не было.

Фторгипс/фторангидрит — побочный продукт, производства плавиковой кислоты [10, 32, 33]. На 1 тонну плавиковой кислоты приходится

3,6–4,25 тонны ФТГ. Минеральный состав фторгипса аналогичен составу природного ангидрита, однако присутствие остатков плавиковой кислоты предопределяет его низкие значения pH 2–3 [32], которые отрицательно сказываются на процессах структурообразования и физико-механических характеристиках конечных изделий. Однако при нейтрализации ФТГ растворами щелочи возможно его использование в качестве альтернативы природному ангидриту при производстве одно- и многокомпонентных вяжущих.

Для производства плавиковой кислоты ежегодно перерабатывается порядка 2 млн т флюорита, а ее общемировое потребление составляет более 650 тыс. т в год и имеет тенденцию к росту. Мировым лидером по производству плавиковой кислоты являются Китай, далее идут Мексика, ЮАР и Монголия. В России отсутствуют крупные заводы по производству плавиковошпатовой сырьевой продукции, в первую очередь это связано с низким содержанием CaF_2 (менее 30 %) в рудах российских месторождений [34]. Однако не смотря на отсутствие крупных производств, накопленные запасы данного отхода на территории РФ достаточно большие, в частности, как отмечают авторы [35], на шламохранилищах ОАО «Полевский криолитовый завод» скопилось порядка 10 млн т фторгипса, кроме того, в процессе разложения флюоритового концентрата ежегодно образуется до 150 тыс. т фторангидрита. Таким образом проблема переработки данного отхода стоит достаточно остро, о чем также свидетельствует большой объем публикаций в российском научном сегменте [36–40 и др.].

Нитрогипс — побочный продукт, образующийся при производстве кальциевой селитры. Несмотря на то, что в источнике [10] в общей структуре гипсосодержащих отходов НГ занимает 6 позицию информации, об объемах его производства и переработки найдено не было ни в зарубежном, ни в российском научном сегменте статей. Вероятнее всего проблема накопления и переработки данного отхода актуальна только для Китая.

Цитрогипс — образуются при производстве лимонной кислоты в процессе микробиологического синтеза мелассы с использованием культуры *Aspergillus niger*, которую выращивают поверхностным или погружным способами [41]. Основными примесями, которые содержит данный отход, является оксалат кальция и оксиды кремния и магния. Данный отход является наиболее крупнотоннажным среди гипсосодержащих отходов, образующихся при производстве органических кислот (муравьиная, винная, молочная). На одну тонну лимонной кислоты образуется 1,34 т цитрогипса [10].

По сравнению отходами производства минеральных кислот и других химических производств, цитрогипс не содержит в своем составе примесей, наносящих существенный вред окружающей среде (например, тяжелые металлы), а основным его недостатком с позиции использования в качестве альтернативы природному сырью, является присутствие остатков лимонной кислоты, высокая дисперсность и пористость частиц. Первое – замедляет схватывание, второе – повышает водопотребность и снижает физико-механические характеристики конечных изделий. Однако, в настоящее время существует положительный опыт применения цитрогипса и как в качестве регулятора сроков схватывания цемента, так и в качестве сырья для производства низкомарочных гипсовых вяжущих и высокоэффективных композиционных вяжущих [42].

По данным Strategy Partners – ведущей российской консалтинговой Компани, мировое производство лимонной кислоты с 2019 по 2024 г. выросло в 1,3 раза и достигло значений 3,1 млн тонн. Основным производителем лимонной кислоты в мире является Китай на его долю приходится 73% от общемирового выпуска. В России на сегодняшний день заводы по производству лимонной кислоты отсутствуют. В 2017 году было закрыто единственное существовавшее на тот момент в России предприятие по производству лимонной кислоты – АО БЗЛК "ЦИТРОБЕЛ" (г. Белгород), мощность которого составляла 12 тыс. т в год. Причиной закрытия стало отрицательное влияние завода на экологическую обстановку города. Общие объемы цитрогипса, накопленные за время работы заводы, по приблизительным оценкам составляли более 350 тыс. м³ [43]. В настоящее время потребность в лимонной кислоте обеспечивается за счет импорта из Китая, однако уже ведется строительство двух новых заводов: «Цитрон» в Воронежской области, планируемая мощность 20 тыс. т лимонной кислоты в год, запуск первой линии запланирован на первый квартал 2026 года [44], и в Тульской области компанией «Органические кислоты» в 2025 году планируется запуск первой линии завода по производству лимонной, молочной кислоты и их солей годовой мощностью 70 тыс. тонн [45]. Таким образом прогнозируемые суммарные годовые объемы образования цитрогипса могут составлять порядка 120 тыс. т.

Борогипс – образуется как побочный продукт реакции борокальцита (твёрдого борокальцита $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ или силикоборокальцита $2\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и серной кислоты в процессе производства борной кислоты [10, 46]. Необходимо отметить, что, как и в случае с фосфогипсом, борогипс, в зависимости от исходного

минерального боросодержащего сырья, будет иметь существенные различия по химическому составу. Так доломитовый борогипс отличается повышенным содержанием соединений кремнезема (более 25 %) и низким содержанием $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (≈ 65 %), в то время как о ашаритовый борогипс на ≈ 86 % состоит из $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, отличается относительно низким содержанием оксидов кремния, однако содержит в своем составе соединения бора и сернокислого магния [5]. Повышенное содержание оксида кремния в доломитовом борогипсе делает его перспективными с позиции получения соединений на основе силикатов, также есть положительный опыт использования борогипса в цементной промышленности и в качестве сырья для производства гипсовых вяжущих [5, 46], однако, как и в случае с фосфогипсом, из-за непостоянства химического состава БГ, при выборе эффективного направления переработки требуется применять локальный подход.

Мировым лидером по запасам борных руд (53 %) является Турция, общий годовой объем добываемых на ее территории борных руд составляет 1,3 млрд т, а общие объемы отходов – 550 000 тонн в год [47]. Единственным предприятием по производству борной кислоты на территории РФ является Дальнегорский горно-обогатительный комбинат. В 2023 году объемы выпуска борной кислоты на данном предприятии составили 47,2 тыс. т, при этом на каждую тонну борной кислоты образуется в среднем 6,1 т борогипса, состоящего в основном из двуводного гипса (до 76 %) и кремнезема (до 21 %) [46]. По данным авторов [46] общее количество отходов производства борной кислоты в Дальневосточном регионе (г. Дальнегорск и г. Комсомольск-на-Амуре) составляет более 50 млн. т.

В таблице 1 приведены общие характеристики отходов, включая реакции, в ходе которых они образуются и объемы образования на 1 тонну товарной продукции. Ориентируясь на примерные цифры образования того или иного ГСО на тонну конечного товарного продукта и годовые объемы данного продукта, можно предположить масштабы их образования в год, как на отдельных предприятиях, так и в рамках страны и мира в целом.

Говоря о возможности использования гипсо-содержащих отходов в строительной отрасли можно ориентироваться на результаты, представленные в обзорах литературных источников по данному направлению [10, 42] из которых следует, что изученная мировым научным сообществом область применения ГСО очень разнообразна. При этом основным направлением явля-

ется использование ГСО в качестве добавки, регулирующей сроки схватывания цемента, в первую очередь по причине отсутствия необходимости нивелирования их высокой дисперсности. Также достаточно большой объем исследований направлен на рассмотрение возможности

получения из ГСО низко-, высокомарочных однокомпонентных и водостойких многокомпонентных вяжущих. На третьем месте идет использование ГСО в дорожном строительстве.

Таблица 1

Обобщённые сведения о гипсоодержащих отходах

№ п.п.	Вид и принятое обозначение ГСО в отечественной и зарубежной литературе	Основной товарный продукт	Химическая реакция, в ходе которой образуется гипсоодержащий отход	Объем выхода (т) на 1 т товарной продукции
1	Десульфурированный гипс из дымовых газов или сульфогипс (ДГДГ) Flue gas desulphurization gypsum (FGDG)	Электроэнергия	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ $\text{H}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HSO}_3^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{SO}_3^{2-}$ $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaCO}_3 + 2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$	2,7*
2	Фосфогипс (ФГ) Phosphogypsum (PG)	Ортофосфорная кислота, фосфатные удобрения	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F} + 5\text{H}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_3\text{PO}_4 + 5\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{HF}$	4,5–5
3	Титангипс (ТГ) Titanium gypsum (TG)	Диоксид титана	$\text{FeTiO}_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{TiOSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{FeSO}_4$ $\text{TiOSO}_4 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$	5–10
4	Соляной гипс Salt gypsum (SG)	Соль или концентрированная морская вода	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{NaCl}$	0,05 (морской) 0,16 (скважинной)
5	Фторангидрит/Фторгипс (ФТГ) Fluorgypsum (FG)	Плавиковая кислота	$\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SO}_4 + 2\text{HF}$	3,6–4,32
6	Нитрогипс (НГ) Nitro gypsum (NG)	Кальциевая селитра	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4$	1,25
7	Цитрогипс (ЦГ) Citric acid gypsum (CAG)	Лимонная кислота	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + 4\text{H}_2\text{O}$ $2\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1,34
8	Борогипс (БГ) Borogypsum (BG)	Борная кислота	$\text{Ca}_2(\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}_3\text{BO}_3 + 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,93–6,1

*так ДГДГ образуется в процессе десульфурации диоксида серы из дымовых газов угольных электростанций, то объемы его образования приведены на каждую тонну поглощенного SO_2

Продолжение таблицы 1

№ п.п.	Примеси	Свойства	Степень утилизации, основные сложности на пути использования в качестве альтернативы природному сырью	Источник
1	ионы тяжелых металлов и карбонаты	Цвет: желтовато-белый или серовато-коричневый Содержание гипса 93–95 % Истинная плотность 2350–2370 г/см ³ Размер частиц 30–60 мкм Морфология кристаллов: короткие столбчатые мелкие частицы с соотношением длины к диаметру от 1,5 до 2,5 pH 7,0–9,0	Самый «чистый» отход, может использоваться как полноценная альтернатива природному гипсовому камню. Объемы утилизации 80–100 %	[10–14, 49, 50]
2	фосфаты, фториды, сульфаты, тяжелые металлы, остаточная кислота, природные радионуклиды, редкоземельные элементы	Цвет: белый, бледно-желтый, светло-пепельно-серый, темно-угольный, бурый Содержание гипса 80–98 % Истинная плотность 2250–2400 кг/м ³ Размер частиц 5–120 мкм Морфология кристаллов (5 типов): ромбический, агрегатный мелко ромбический, кластерный, агрегатный короткоигольчатый, игольчатый pH 1–8 (в зависимости от длительности хранения и наличия стадии нейтрализации)	Существенный разброс по химическому составу и морфологии частиц, присутствие большого количества примесей не дает возможности выработки единых подходов к переработке. Требуется дополнительной очистки и контроля радиационного фона. Объемы утилизации 15–40 %	[15–17, 21–26, 51, 52]
3	кремнезем, оксида железа магния, диоксида титана	Цвет: красновато-желтый, бурый Размер частиц 1–60 мкм Морфология кристаллов: пористые волокнистые и пластинчатые pH > 9,0	Бурый цвет требует дополнительной очистки, мелкие пористые частицы не обеспечивают получение гипсовых изделий с достаточно высокими физико-механическими характеристиками. Объемы утилизации 10 %	[10, 27–29, 53]
4	8–10 % NaCl, MgCl ₂ , тяжелые металлы	Цвет: белый серый Размер частиц 4–6 мкм Морфология кристаллов: ромбические (скважинный) столбчатые (морской) pH 8–10	Мелкие кристаллы и присутствие значительного количества соли вызывает коррозию оборудования, отрицательно сказывается на процессах структурообразования гипсовых и цементных вяжущих	[10, 30, 31]
5	серная кислота, плавиковая кислота, фторид кальция	Цвет: белый, серый Содержание ангидрита до 70 % гипса – до 20 %, Истинная плотность 2570 кг/м ³ Морфология кристаллов: призматические pH 2–3	Сильная кислотность, крайне низкая активность, длительный период гидратации, низкие механические свойства и плохая водостойкость материалов. Для нейтрализации требуется дополнительная обработка щелочными растворами	[32–40]
6	–	Цвет: серо-белый или желтовато-коричневый Морфология кристаллов: столбчатых кристаллов с разбросанными мелкими частицами неправильной формы pH > 7	–	[10]
7	оксалат кальция, оксид кремния, оксид магния	Цвет: белый, серый Истинная плотность 2350–2400 кг/м ³ Размер частиц 16–45 мкм Морфология кристаллов: пластинчатые pH < 7	Присутствие примесей и достаточно развитая поверхность кристаллов, высокая водопотребность вяжущих	[41, 54, 55]
8	аморфный кремнезем, борная кислота	Цвет: светло желтый Истинная плотность 2600 кг/м ³ Размер частиц до 500 мкм Морфология кристаллов: круглой и неправильной формы с зазорами pH 8–9	Существенный разброс по составу и низкое содержание CaSO ₄ ·2H ₂ O не дает выработать единый подход к утилизации и ограничивает его использования в качестве сырья для получения гипсовых вяжущих	[5, 45, 46, 47, 56]

Выводы. В контексте рассмотренных восьми видов гипсосодержащих отходов можно сделать вывод, что схема образования отходов и значимость их переработки в Российской Федерации и Китае отличаются. В частности, в России практически отсутствует информация о нитрогипсе, титановом и соляном гипсах, что вероятнее всего связано с их низкой тоннажностью, при этом наибольшее количество публикаций посвящено вопросам переработки фосфогипса, фторгипса/фторангидрита, борогипса и цитрогипса.

В России наиболее представительными являются побочные продукты производства минеральных кислот (ортофосфорной, плавиковой, ортоборной) – фосфогипс, фторангидрит/фторгипс, борогипс. Общим фактором, определяющим сложность их использования в качестве полноценной альтернативы гипсовому камню, является непостоянство состава и структурно-морфологических особенностей, а также наличие примесей, что в свою очередь зависит от качества исходных пород и особенностей технологического режима производства кислот. Обозначенные особенности исключают выработку единого подхода к переработки данных ГСО, требуют локального подхода вплоть до разработки нового технологического оборудования, что существенно осложняет и удорожает процесс и негативно сказывается на цене конечного продукта, качество которого, к тому же, может существенно уступать качеству продукта из природного гипсового сырья.

Наиболее представительным среди отходов производства органических кислот является цитрогипс, образующийся при биохимическом синтезе лимонной кислоты. Несмотря на то, что в России на данный момент лимонная кислота не производится, планируемый в ближайшем времени запуск новых предприятий с суммарным годовым объемом 90 тыс. т, оставляет актуальным вопрос поиска путей утилизации ЦГ. Если учесть, что в отличие от отходов производства минеральных кислот, цитрогипс не имеет существенный разброс по химическому составу и структурно-морфологическим признакам, возможность разработки единого подхода к его переработке в вяжущие представляется более реальной. При этом целесообразно рассмотреть это уже на этапе строительства предприятий, предусмотрев, например, линию по получению гипсовых вяжущих ($\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), положительный опыт получения которых из цитрогипса накоплен в большом объеме.

Не смотря на большие общемировые объемы производства крайне низкое внимание уделяется сульфогипсу. Так как его выход рассчитывается не на товарную продукцию (электроэнергию), а на каждую тонну SO_2 , объёмы данного отхода на

территории РФ оценить по данным открытых источников не представляется возможным. Вероятно, отсутствие большого интереса к данному отходу обусловлено его относительной «чистотой» по сравнению с другими ГСО, а, следовательно, меньшими экологическими рисками при хранении. В тоже время ДГДГ является полноценной альтернативой природному гипсовому камню в Германии и Японии, что, в том числе, связано со значительно меньшими территориальными ресурсами данных стран и более жесткой государственной политикой в сфере экологии.

Источник финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки (FZWG-2024-0001), при административной поддержке НОЦ «Инновационные решения в АПК» г. Белгород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей редакцией А.В. Ферронской. Изд-во АСВ, 2004. 488 с.
2. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение – от П.П. Будникова до наших дней // Строительные материалы. 2005. № 9. С. 40–44.
3. Ферронская А.В. Развитие теории и практики в области гипсовых вяжущих веществ // Строительные материалы. 2000. № 2. С. 26–28.
4. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. М.: Стройиздат, 1974. 238 с.
5. Гордашевский П.Ф., Долгоров А.В. Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов. М.: Стройиздат, 1987. 105 с.
6. Mineral Commodity Summaries, 2025. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Pp. 134–135. [Интернет ресурс: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>].
8. Ильин А.П., Кочетков С.П., Брыль С.В., Рухлин Г.В. Проблемы и перспективы использования вторичных продуктов переработки природных фосфатов для получения строительных материалов // Экология и строительство. 2016. №4. С. 21–29.

9. Федорчук Ю.М., Леонова Л.А., Солодов Е.В., Губа Э.А. Эколого-экономически эффективный способ утилизации фторангидрита // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 12. С. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704
10. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609
11. Aakriti, Maiti S., Jain N., Malik J. A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 393. 131918 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131918
12. Córdoba P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs // Fuel. 2015. Vol. 144. Pp. 274–286. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.065
13. Захаринский Ю.Н., Назиров Р.А., Тарасов И.В., Шарафутдинов Р.А., Жжонных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю. Использование продуктов десульфуризации дымовых газов для производства гипсового вяжущего и изделий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 2(794). С. 51–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-51-63
14. Дамбиев Ц.Ц., Афанасьев К.А., Дамбиев Ч.Ц. О возможности использования отходов сероочистки Гусиноозерской ГРЭС для получения строительных материалов // Строительные материалы. 2000. № 4. С. 28–29
15. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
16. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V., Mazouz H., Dumitraş D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ş., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561.
17. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90(8). Pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
18. Abouzeid A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview // International Journal of Mineral Processing. 2008. Vol. 85, Issue 4. Pp. 59–84. DOI: 10.1016/j.minpro.2007.09.001.
19. Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих // Региональная архитектура и строительство. 2024. №1 (58). С. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82
20. Непряхин А.Е., Беляев Е.В., Карпова М.И., Лужбина И.В. Фосфоритовая составляющая МСБ России в свете новых технологических возможностей // Георесурсы. 2015. №4 (63). С. 197–207. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207
21. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Kołodziej G. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum // Sustainability. 2025. Vol. 17(8). 3473. DOI: 10.3390/su17083473
22. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects // Applied Sciences. 2021. Vol. 11(4). 1575. DOI: 10.3390/app11041575
23. Hermann L., Kraus F., Hermann R. Phosphorus Processing–Potentials for Higher Efficiency // Sustainability. 2018. Vol. 10(5). 1482. DOI: 10.3390/su10051482
24. Shi X., Zeng A., Duan H., Zhang H., Yang J. Status and development trends of phosphogypsum utilization in China // Circular Economy. 2024. Vol. 3(4). 100116. DOI: 10.1016/j.cec.2024.100116
25. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J.-L. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 908. 168196. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168196
26. Ключевые показатели – О Компании – Интегрированный отчет ПАО «Фосагро» за 2024 г. [Интернет ресурс: <https://ar2024.phosagro.ru/company-profile/key-indicators>]
27. Li X.-yu, Yang J.-yan Production, characterization, and application of titanium gypsum: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 181. Pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.008
28. Wang S., Lin X., Wang C. Dual benefits of indirect mineral carbonation of titanium gypsum: waste gypsum recycling and carbon sequestration // Environmental Research. 2025. Vol. 285, Part 2. 122393. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122393
29. Luo S., Xiang T., Yang L., Liu S., Wang Y., Zhang H., Sun G. Revealing the intricate mechanism

- behind α -hemihydrate gypsum preparation by titanium gypsum reuse through the utilization of diverse organic acid crystal modifiers under microwave hydrothermal condition // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 201, Part A. 107303. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107303
30. Chen C., Xu H., Wu M., Jiu S., Song Q., Chen Y. Synthesis of calcium sulfate hemihydrate whiskers from high-purity salt gypsum in a glycerol-water solution at atmospheric pressure // *Powder Technology*. 2024. Vol. 441. 119857. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119857
31. Luo X., Wei C., Li X., Deng Z., Li M., Fan G. A green approach to prepare polymorph CaCO_3 for clean utilization of salt gypsum residue and CO_2 mineralization // *Fuel*. 2023. Vol. 333, Part 1. 126305. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126305
32. Пурескина О.А., Гашкова В.И., Катышев С.Ф. Утилизация фторангидрита – отхода производства плавиковой кислоты с получением гранулированного гипса // *Экология промышленного производства*. 2008. № 4. С. 19–21.
33. Bazaldua-Medellin M.E., Magallanes-Rivera R.X., Escalante Garcia J.I. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 53. 104590. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104590
34. He H., Wang Y., Wang J., Wang S., Huang R., Zheng L., Ding Y. Comparative study on modifications of pH-adjusted fluorogypsum by potassium carbonate and potassium bicarbonate // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 376. 131069. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131069.
35. ПЛАВИКОВЫЙ ШПАТ – Ресурсы России – НедраДВ. [Интернет ресурс: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ca79a46078f5785d6a24f2c3830d7095>]
36. Пурескина О.А., Гашкова В.И., Катышев С.Ф. Переработка твердых техногенных отходов – фторангидрита и феррошлаков, самораспадающихся с получением гипсового вяжущего вещества // *Экология промышленного производства*. – 2009. № 1. С. 36–38
37. Федорчук Ю.М., Леонова Л.А., Саденова М.А., Дуйсебаев Б.О., Бордунов С.В. Снижение экологической нагрузки на регион за счет рационального способа утилизации фторангидрита // *Безопасность труда в промышленности*. 2024. № 6. С. 80–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-6-80-86
38. Аниканова Л.А. Особенности применения вторичного ангидритового сырья для производства керамических материалов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. Т. 26. № 2. С. 148–156. DOI:10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156
39. Димухаметова А.Ф., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Гордина А.Ф., Саидова З.С. Модификация фторангидритовых вяжущих ультрадисперсным порошком диабазы // *Строительные материалы*. 2022. № 1-2. С. 57–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64
40. Калабина Д.А., Александров А.М., Яковлев Г.И. Фторангидритогипсовые композиции для изготовления декоративных архитектурных деталей и скульптурных изделий // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-52-56
41. Древин В.Е., Шипаева Т.А., Комарова В.И. Технологические основы получения лимонной кислоты // *Пищевая промышленность*. 2013. №12. С. 46–47.
42. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Titenko A.A. Utilization of gypsum-bearing wastes in materials of the construction industry and other areas // *Construction Materials and Products*. 2021. Т. 4. №1. С. 5–17. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-1-5-17
43. Pirieva S., Alfimova N., Levickaya K. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. Vol. 100. 10007. DOI: 10.4123/CUBS.100.7
44. Первый в России завод по производству лимонной кислоты строят в Воронежской области. [Интернет ресурс: <https://dzen.ru/a/Z8BhgTFJlg1AlENp?ysclid=mf9z97ftx9520966485>]
45. Перспективы производства лимонной кислоты в России: от инвестиций к реализации. [Интернет ресурс: <https://sfera.fm/articles/ingredienty/perspektivy-proizvodstva-limonnoi-kisloty-v-rossii-ot-investitsii-k-realizatsii?ysclid=mf9zca7x75437114189>]
46. Комплексная переработка борсодержащего минерального сырья и техногенных отходов : монография / кол. Авторы ; под науч. Ред. Д-ра техн. наук, проф. П.С. Гордиенко ; отв. Ред. С.Б. Ярусова, И.Ю. Буравлев. Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2024. 198 с.
47. Boncukcuoğlu R., Yılmaz M.T., Kocakerim M.M., Tosunoğlu V. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. Pp. 471–475. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6
48. Гордиенко П.С., Козин А.В., Ярусова С.Б., Згиблый И.Г. Комплексная переработка отходов производства борной кислоты с получением материалов для стройиндустрии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*

(научно-технический журнал). 2014. № S4-9. С. 60–66.

49. Bakshi P., Pappu A., Bharti D. K. Transformation of flue gas desulfurization (FGD) gypsum to β -CaSO₄·0.5H₂O whiskers using facile water treatment // *Materials Letters*. 2022. Vol. 308, Part B. 131177. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131177

50. Wang H., Wang F., Qin W., He C., Wang F., Liang X., Li X. A critical review on the use of flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkali soils and its prospect for reducing carbon emissions // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 945. 174053. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174053

51. Alfimova N., Levickaya K., Buryanov A., Nikulin I., Kozhukhova M., Strokova V. Effect of phosphogypsum characteristics on the properties of phosphogypsum based binders // *Journal of Composites Science*. Vol. 9(8). 413. DOI:10.3390/jcs9080413

52. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based

Materials // *Resources*. 2024. Vol. 13. 69. DOI: 10.3390/resources13050069

53. Wang Y., Xiang M., Yi J., Wang Y., Tang W., Zhong Y., Meng H., Ma X., Chen Z. Sustainable treatment of solid titanium-gypsum-waste using acidic titanium-white-wastewater to produce high-value α -hemihydrate gypsum // *Hydrometallurgy*. 2025. Vol. 235. 106489. DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106489.

54. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Левицкая К.М. Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 89–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94

55. Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю. Оптимизация параметров изготовления вяжущего из цитрогипса // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. №3. С. 29–42. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_29

56. Sevim U.K., Ozturk M., Onturk S., Bankir M.B. Utilization of boron waste borogypsum in mortar // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 22. Pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.015

Информация об авторах

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail:alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, Победы, д. 85.

Поступила 09.09.2025 г.

© Алфимова Н.И., 2025

Alfimova N.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Belgorod National Research University

E-mail:alfimovan@mail.ru

REVIEW ANALYSIS OF THE FEATURES OF FORMATION AND PROSPECTS OF USE OF GYPSUM-CONTAINING WASTE AS AN ALTERNATIVE TO NATURAL GYPSUM RAW MATERIAL

Abstract. Gypsum-based products are in high demand in the construction materials market due to a number of their positive qualities. Despite the large reserves of natural gypsum raw materials worldwide, an affordable alternative to natural resources is gypsum-containing waste from various industrial enterprises, the use of which meets the requirements of rational nature management and carbon footprint reduction. The purpose of this review was to analyze the diversity of gypsum-containing waste from various industrial enterprises from the standpoint of the technological process and volumes of occurrence, structural and morphological features and impurities contained, as well as the state and prospects for use as an alternative to natural gypsum raw materials. Eight types of the largest-tonnage gypsum-containing waste were the objects of the study. The paper analyzes the share of each of them in the global and domestic production volumes, it was found that the waste generation scheme and the scale of their processing in the Russian Federation, China and the world as a whole have significant differences. The most representative by-products of mineral acid production in Russia are phosphogypsum, fluoroanhydrite/fluorogypsum, borogypsum, the disposal of which is the subject of the largest number of publications. At the same time, the disposal of desulphurized gypsum from flue gases (sulphogypsum), which is the most “clean” large-tonnage gypsum-containing waste, is given extremely little

attention in our country, and there is virtually no information on some wastes (nitrogypsum, titanium gypsum, hydrochloric gypsum).

Keywords: gypsum-containing waste, phosphogypsum, desulphurized gypsum from flue gases, sulphogypsum, phosphogypsum, titanium gypsum, hydrochloric gypsum, fluorogypsum, fluoroanhydrite, nitrogypsum, citrogypsum, borogypsum.

REFERENCES

1. Gypsum materials and products (production and application) [Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye). Spravochnik]. Handbook. Under the general editorship of A.V. Ferronskaya. ASV Publishing House, 2004. 488 p. (rus)
2. Buryanov A.F. Gypsum, its research and application – from P.P. Budnikov to the present day [Gips, ego issledovanie i primeneniye – ot P.P. Budnikova do nashikh dnei]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2005. No. 9. Pp. 40–44. (rus)
3. Ferronskaya A.V. Development of theory and practice in the field of gypsum binders [Razvitie teorii i praktiki v oblasti gipsovykh vyazhushchikh veshchestv]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2000. No. 2. Pp. 26–28. (rus)
4. Volzhensky A.V., Ferronskaya A.V. Gypsum binders and products [Gipsovye vyazhushchie i izdeliya]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 238 p. (rus)
5. Gordashevsky P.F., Dolgorev A.V. Production of gypsum binders from gypsum-containing waste [Proizvodstvo gipsovykh vyazhushchikh materialov iz gipsosoderzhashchikh otkhodov]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 105 p. (rus)
6. Mineral Commodity Summaries, 2025. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Pp. 134–135. [Internet resource: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>]. (rus)
8. Il'in A.P., Kochetkov S.P., Bryl' S.V., Rukhlin G.V. Problems and prospects of using secondary products of natural phosphate processing for obtaining building materials [Problemy i perspektivy ispol'zovaniya vtorichnykh produktov pererabotki prirodnnykh fosfatov dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Ecology and Construction. 2016. No. 4. Pp. 21–29. (rus)
9. Fedorchuk Yu.M., Leonova L.A., Solodov E.V., Guba E.A. Ecologically and economically efficient method of utilization of fluoroanhydrite [Ekologo-ekonomicheski effektiv-nyy sposob utilizatsii fluorangidrita]. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2024. Vol. 335. No. 12. Pp. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704
10. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials. Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609
11. Aakriti, Maiti S., Jain N., Malik J. A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 393. 131918. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131918
12. Córdoba P. Status of Flue Gas Desulphurization (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physico-chemical control processes of wet limestone FGDs. Fuel. 2015. Vol. 144. Pp. 274–286. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.065
13. Zakharyinsky Yu.N., Nazirov R.A., Tarasov I.V., Sharafutdinov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu. Use of flue gas desulphurization products for the production of gypsum binders and products [Ispol'zovaniye produktov desulfurizatsii dymovykh gazov dlya proizvodstva gipsovogo vyazhushchego i izdeliy]. News of higher educational institutions. Construction. 2025. Vol. 2 (794). Pp. 51–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-51-63. (rus)
14. Dambiev Ts.Ts., Afanasyev K.A., Dambiev Ch.Ts. On the possibility of using desulphurization waste from the Gusinozerskaya GRES to obtain building materials [O vozmozhnosti ispol'zovaniya otkhodov seroочistki Gusinozerskoy GRES dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2000. No. 4. Pp. 28–29. (rus)
15. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
16. Bilal E., Bellefqih H., Bourquier V., Mazouz H., Dumitras D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ș., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561
17. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90(8). Pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
18. Abouzeid A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview. International Journal of Mineral Processing.

2008. Vol. 85(4). Pp. 59–84. DOI: 10.1016/j.minpro.2007.09.001.

19. Levitskaya K.M., Alfimova N.I., Buryanov A.F. Use of phosphogypsum as a raw material for the production of one-component binders [Ispol'zovaniye fosfogipsa kak syr'ya dlya proizvodstva odnocomponentnykh vyazhushchikh]. Regional architecture and engineering. 2024. Vol. 1(58). Pp. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82 (rus)

20. Nepryakhin A.E., Belyaev E.V., Karpova M.I., Luzhbina I.V. Phosphorite component of the mineral resource base of Russia in light of new technological capabilities [Fosforitovaya sostavlyayushchaya MSB Rossii v svete novykh tekhnologicheskikh vozmozhnostey]. Georesources. 2015. No. 4 (63). Pp. 197–207. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207 (rus)

21. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Kołodziej G. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum. Sustainability. 2025. Vol. 17(8). 3473. DOI: 10.3390/su17083473

22. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubik H. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects. Applied Sciences. 2021. Vol. 11(4). 1575. DOI: 10.3390/app11041575

23. Hermann L., Kraus F., Hermann R. Phosphorus Processing—Potentials for Higher Efficiency. Sustainability. 2018. Vol. 10(5). 1482. DOI: 10.3390/su10051482

24. Shi X., Zeng A., Duan H., Zhang H., Yang J. Status and development trends of phosphogypsum utilization in China. Circular Economy. 2024. Vol. 3(4). 100116. DOI: 10.1016/j.ccc.2024.100116

25. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J.-L. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? Science of The Total Environment. 2024. Vol. 908. 168196. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168196

26. Key indicators – About the Company – Integrated report of PJSC PhosAgro for 2024 [Klyuchevye pokazateli – O Kompanii – Integrirovannyj otchet PAO «FosagRO» za 2024 g]. [Internet resource: <https://ar2024.phosagro.ru/company-profile/key-indicators>] (rus)

27. Li X.-yu, Yang J.-yan Production, characterisation, and application of titanium gypsum: A review. Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 181. Pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.008

28. Wang S., Lin X., Wang C. Dual benefits of indirect mineral carbonation of titanium gypsum: waste gypsum recycling and carbon sequestration. Environmental Research. 2025. Vol. 285, Part 2. 122393. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122393

29. Luo S., Xiang T., Yang L., Liu S., Wang Y., Zhang H., Sun G. Revealing the intricate mechanism behind α -hemihydrate gypsum preparation by titanium gypsum reuse through the utilization of diverse organic acid crystal modifiers under microwave hydrothermal condition. Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 201, Part A. 107303. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107303

30. Chen C., Xu H., Wu M., Jiu S., Song Q., Chen Y. Synthesis of calcium sulfate hemihydrate whiskers from high-purity salt gypsum in a glycerol–water solution at atmospheric pressure. Powder Technology. 2024. Vol. 441. 119857. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119857

31. Luo X., Wei C., Li X., Deng Z., Li M., Fan G. A green approach to prepare polymorph CaCO_3 for clean utilization of salt gypsum residue and CO_2 mineralization. Fuel. 2023. Vol. 333, Part 1. 126305. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126305

32. Pureskina O.A., Gashkova V.I., Katyshev S.F. Utilization of fluoroanhydrite – waste from hydrofluoric acid production with obtaining granulated gypsum [Utilizatsiya fluorangidrita – otkhoda proizvodstva plavikovoy kisloty s polucheniyem granulirovannogo gipsa]. Ecology of industrial production. 2008. No. 4. Pp. 19–21. (rus)

33. Bazaldua-Medellin M.E., Magallanes-Rivera R.X., Escalante Garcia J.I. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 53. 104590. DOI: 10.1016/j.job.2022.104590

34. He H., Wang Y., Wang J., Wang S., Huang R., Zheng L., Ding Y. Comparative study on modifications of pH-adjusted fluorogypsum by potassium carbonate and potassium bicarbonate. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 376. 131069. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131069.

35. FLUOROSPAR – Resources of Russia – NedraDV [PLAVIKOVYJ SHPAT – Resursy Rossii – NedraDV]. [Internet resource: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ca79a46078f5785d6a24f2c3830d7095>] (rus)

36. Pureskina O.A., Gashkova V.I., Katyshev S.F. Processing of solid technogenic waste – fluoroanhydrite and ferrosilag, self-decomposing with the production of gypsum binder [Pererabotka tverdykh tekhnogennykh otkhodov – fluorangidrita i ferrosilakov, samoraspadayushchikhsya s polucheniyem gipsovogo vyazhushchego veshchestva]. Ecology of industrial production. 2009. No. 1. Pp. 36–38. (rus)

37. Fedorchuk Yu.M., Leonova L.A., Sadenova M.A., Duisebaev B.O., Bordunov S.V. Reducing the environmental burden on the region due to a rational method of fluoroanhydrite utilization [Snizheniye

ekologicheskoy nagruzki na region za schet ratsional'nogo sposoba utilizatsii ftorangidrita]. Occupational Safety in Industry. 2024. No. 6. Pp. 80–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-6-80-86 (rus)

38. Anikanova L.A. Features of the use of secondary anhydrite raw materials for the production of ceramic materials [Osobennosti primeneniya vtorichnogo angidritovogo syr'ya dlya proizvodstva keramicheskikh materialov]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2024. Vol. 26. No. 2. Pp. 148–156. DOI:10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156 (rus)

39. Dimukhametova A.F., Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Buryanov A.F., Gordina A.F., Saidova Z.S. Modification of fluoroanhydrite binders with ultrafine diabase powder [Modifikatsiya ftorangidritovykh vyazhushchikh ul'tradispersnym poroshkom diabaza]. Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2022. No. 1-2. Pp. 57–64. DOI:10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64 (rus)

40. Kalabina D.A., Aleksandrov A.M., Yakovlev G.I. Fluoroanhydrite gypsum compositions for the manufacture of decorative architectural details and sculptural products [Ftorangidritogipsovyye kompozitsii dlya izgotovleniya dekorativnykh arkhitekturnykh detaley i skulpturnykh izdeliy]. Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2021. No. 11. Pp. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-52-56 (rus)

41. Drevin V.E., Shipaeva T.A., Komarova V.I. Technological foundations for obtaining citric acid [Tekhnologicheskiye osnovy polucheniya limonnoy kisloty]. Food industry. 2013. No. 12. Pp. 46–47. (rus)

42. Alfimova N.I. Pirieva S.Yu., Titenko A.A. Utilization of gypsum-bearing wastes in materials of the construction industry and other areas. Construction Materials and Products. 2021. Vol. 4(1). Pp. 5–17. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-1-5-17

43. Pirieva S., Alfimova N., Levickaya K. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production. Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. Vol. 100. 10007. DOI: 10.4123/CUBS.100.7

44. The first citric acid production plant in Russia is being built in the Voronezh region [Pervyy v Rossii zavod po proizvodstvu limonnoy kisloty stroyat v Voronezhskoy oblasti. Internet resurs]. [Internet resource: <https://dzen.ru/a/Z8BhgTFJlg1AlENp?ysclid=mf9z97ftx9520966485>] (rus)

45. Prospects for citric acid production in Russia: from investment to implementation [Perspektivy proizvodstva limonnoy kisloty v Rossii: ot investitsiy k realizatsii]. [Internet resource: [proizvodstva-limonnoi-kisloty-v-rossii-ot-investitsii-k-realizatsii?ysclid=mf9zca7x75437114189\] \(rus\)](https://sfera.fm/articles/ingredienty/perspektivy-</p></div><div data-bbox=)

46. Integrated processing of boron-containing mineral raw materials and man-made waste: monograph [Kompleksnaya pererabotka borsoderzhashchego mineral'nogo syr'ya i tekhnogennykh otkhodov]. Co. of authors; under scientific editorship of Doctor of Technical Sciences, prof. P.S. Gordienko; responsible editor. S.B. Yarusova, I.Yu. Burav lion. Vladivostok: VVGU Publishing House, 2024. 198 p. (rus)

47. Boncukcuoglu R., Yilmaz M.T., Kocakerim M.M., Tosunoğlu V. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production. Cement and Concrete Research. 2002. Vol. Pp. 471–475. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6

48. Gordienko P.S., Kozin A.V., Yarusova S.B., Zgiblyy I.G. Complex processing of boric acid production waste to obtain materials for the construction industry [Kompleksnaya pererabotka otkhodov proizvodstva bornoy kisloty s polucheniym materialov dlya stroyindustrii]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2014. No. S4-9. Pp. 60–66. (rus)

49. Bakshi P., Pappu A., Bharti D.K. Transformation of flue gas desulfurization (FGD) gypsum to β -CaSO₄·0.5H₂O whiskers using facile water treatment. Materials Letters. 2022. Vol. 308, Part B. 131177. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131177

50. Wang H., Wang F., Qin W., He C., Wang F., Liang X., Li X. A critical review on the use of flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkali soils and its prospect for reducing carbon emissions. Science of The Total Environment. 2024. Vol. 945. 174053. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174053

51. Alfimova N., Levickaya K., Buryanov A., Nikulin I., Kozhukhova M., Strokova V. Effect of phosphogypsum characteristics on the properties of phosphogypsum based binders. Journal of Composites Science. Vol. 9(8). 413. DOI: 10.3390/jcs9080413

52. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. Resources. 2024. Vol. 13. 69. DOI: 10.3390/resources13050069

53. Wang Y., Xiang M., Yi J., Wang Y., Tang W., Zhong Y., Meng H., Ma X., Chen Z. Sustainable treatment of solid titanium-gypsum-waste using acidic titanium-white-wastewater to produce high-value α -hemihydrate gypsum. Hydrometallurgy. 2025. Vol. 235. 106489. DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106489.

54. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Levitskaya K.M. Improving in quality characteristics of pressed products from citrogypsum and based binders.

Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2023. No. 5. Pp. 89–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94 (rus)

55. Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Elistratkin M.Yu. Optimization of parameters for manufacturing a binding from citrogypsum [Optimizatsiya parametrov izgotovleniya vyazhushchego iz

tsitrogipsa]. Regional architecture and engineering. 2023. No. 3. Pp. 29–42. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_29 (rus)

56. Sevim U.K., Ozturk M., Onturk S., Bankir M.B. Utilization of boron waste borogypsum in mortar. Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 22. Pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.015

Information about the authors

Alfimova, Nataliya I. PhD, Associate professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia. Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy str., 308015 Belgorod, Russia.

Received 09.09.2025

Для цитирования:

Алфимова Н.И. Обзорный анализ особенностей образования и перспектив использования гипсосодержащих отходов в качестве альтернативы природному гипсовому сырью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 20–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-20-35

For citation:

Alfimova N.I. Review analysis of the features of formation and prospects of use of gypsum-containing waste as an alternative to natural gypsum raw material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 20–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35