ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

# Получение карбоната кальция с заданными свойствами крупности как фактор эффективной утилизации техногенного гипсосодержащего сырья

**Д.В.Сучков✉, Т.Е.Литвинова, А.П.Лебедев**
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью***: Сучков Д.В., Литвинова Т.Е., Лебедев А.П. Получение карбоната кальция с заданными свойствами крупности как фактор эффективной утилизации техногенного гипсосодержащего сырья // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 90-104. EDN KGCKGR

***Аннотация***
Исследование посвящено разработке способа утилизации фосфогипса – крупнотоннажного отхода переработки фосфатного сырья, объекты размещения которого являются источниками комплексного негативного воздействия на компоненты окружающей среды. В качестве перспективного метода утилизации гипсосодержащих отходов рассмотрено взаимодействие фосфогипса с раствором карбоната натрия (карбонатная конверсия) с получением карбоната кальция – товарного фосфомела. Существующие технологии предполагают получение мелкодисперсного продукта, что затрудняет его фильтрацию и ограничивает области применения фосфомела. Цель исследования – определение параметров карбонатной конверсии фосфогипса, обеспечивающих получение фосфомела с заданными свойствами крупности при сохранении высокой степени конверсии исходного сырья. В рамках серии однофакторных экспериментов выполнена оценка влияния на процесс конверсии $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ условий реакции – температуры, концентрации карбонатного раствора $Na_2CO_3$, отношения жидкой и твердой фаз (Ж:Т) и продолжительности их контакта. Установлено, что повышение температуры конверсии до 90-100 °С и Ж:Т до 10 способствует интенсивному зародышеобразованию кристаллов $CaCO_3$ и получению крупных агломератов. Концентрация $Na_2CO_3$ 250 г/дм$^3$ и продолжительность конверсии до 3 ч в совокупности обеспечивают увеличение крупности получаемого фосфомела до $D90 = 45$ мкм при степени конверсии 98,8 %. Полученный продукт по своим характеристикам пригоден для использования в металлургической промышленности в качестве сырья для получения флюса, что подтверждает его конкурентоспособность на рынке вторичных ресурсов. Разработанные рекомендации позволяют создать малоотходную технологию переработки техногенного сырья, соответствующую принципам устойчивого развития и способствующую снижению техногенной нагрузки на компоненты окружающей среды.

***Ключевые слова***
гипсосодержащие отходы; карбонат кальция; карбонатная конверсия; утилизация отходов; скорость фильтрации пульп; фосфогипс; фосфомел

***Финансирование***
Отсутствует.

***Поступила: 31.03.2026*** ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 18.09.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

## Введение

Проблема обращения с крупнотоннажными отходами минерально-сырьевого комплекса, включая отрасль химической (перерабатывающей) промышленности, сохраняет свою остроту на протяжении последних десятилетий. При переработке фосфатного сырья сернокислотным способом только в России ежегодно образуется более 150 млн т фосфогипса (ФГ) – попутного продукта, который представлен преимущественно дигидратом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) или полугидратом сульфата кальция ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$) [1]. На территории Российской Федерации насчитывается 12 предприятий, использующих сернокислотную технологию производства экстракционной фосфорной кислоты, которая является одним из основных источников образования ФГ. В каждом из объектов размещения отходов (ОРО) данных предприятий (гипсонакопителях) размещено порядка 10-12 млн т ФГ. У действующих производств это количество увеличивается ежегодно на 0,8 млн т. Бóльшая часть ОРО приходится на территорию европейской части России, причем на территории



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

только Северо-Западного федерального округа в трех гипсонакопителях размещено уже более 150 млн т отхода (рис.1). Одними из крупнейших ОРО являются:

• «Объединенный шламонакопитель фосфогипса» (№ 35-00029-Х-00592-250914, площадь 500 га, проектная вместимость 120 млн т) Череповецкого химического кластера АО «Апатит»;

• «Полигон вторичных материалов и отходов (отвал фосфогипса)» (№ 64-00066-Х-00592-250914, площадь 159 га, проектная вместимость 121,5 млн т) Балаковского филиала АО «Апатит».

Гипсонакопители зачастую выступают источниками серьезной экологической нагрузки – интенсивного пыления [2] и формирования техногенных гидрохимических потоков вследствие инфильтрации загрязнителей через тело отвалов в почву и подотвальные сточные воды [3-5], которые могут требовать дополнительной очистки [6]. Аналогичные закономерности формирования техногенных гидрохимических потоков выявлены при изучении влияния отходов калийного производства [7] и предприятий по производству минеральных удобрений [8] на поверхностные и подземные воды.

Существующие направления утилизации ФГ включают использование его в строительной индустрии, сельском хозяйстве, а также для извлечения редкоземельных элементов [9, 10]. Однако содержащиеся в нем водорастворимые примеси затрудняют использование отхода [11], а технологии извлечения ценных компонентов обычно не приводят к существенному сокращению объемов складирования [12]. Все это подтверждает необходимость поиска эффективных мер по снижению воздействия объектов накопленного вреда окружающей среде. В парадигме устойчивого развития наиболее действенным способом минимизации ущерба является не изоляция отходов, а максимальное вовлечение их в хозяйственный оборот в качестве вторичных материальных ресурсов [13, 14]. Для ФГ таким способом выступает карбонатная конверсия [15, 16]. Конверсия фосфогипса в карбонатных средах представляет собой взаимодействие $CaSO_4 \cdot nH_2O$ с карбонатсодержащими растворами (р-р) $M_2CO_3$, где $M^+$ – ионы $NH_4^+$, $Na^+$ или $K^+$, по реакции общего вида

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O + M_2CO_3 = CaCO_3 + M_2SO_4 + 2H_2O.$$

Продуктами конверсии выступают химический осажденный карбонат кальция (фосфомел, ФМ) и соответствующий сульфат $M_2SO_4$ [17, 18]. Следует отметить, что указанный процесс может сопровождаться попутной утилизацией $CO_2$-содержащих дымовых газов при их использовании в качестве источника карбонат-ионов [19, 20].

Однако практическая ценность этого метода напрямую зависит от свойств получаемого фосфомела и прежде всего от крупности его частиц. Известные технические решения в области карбонатной конверсии ФГ сопровождаются общим недостатком – получаемый ФМ представляет собой мелкодисперсный продукт с размером частиц, как правило, не превышающим 20-25 мкм [21]. Наличие такого осадка затрудняет фильтрацию пульпы, что увеличивает энергетические затраты




Рис.1. Локализация объектов-отходообразователей ФГ в РФ



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

на обезвоживание и ограничивает области применения готовой продукции, поскольку в ряде отраслей, включая металлургию и производство строительных материалов, требуется карбонатное сырье большей крупности [22]. Таким образом, решение технологической задачи управления гранулометрическим составом фосфомела является необходимым условием для реализации экологического потенциала метода карбонатной конверсии. Получение продукта с заданными свойствами крупности обеспечивает его востребованность на рынке, замыкает цикл переработки техногенного сырья и, как следствие, снижает объем отходов, направляемых на долговременное размещение.

Цель настоящей работы – определение параметров карбонатной конверсии фосфогипса, обеспечивающих получение фосфомела с заданными свойствами крупности при сохранении высокой степени конверсии исходного сырья. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

• Обоснование выбора карбонатного реагента и диапазонов варьирования технологических параметров.

• Экспериментальная оценка влияния концентрации карбонатного раствора, температуры, соотношения жидкой и твердой фаз (Ж:Т), а также продолжительности процесса на степень конверсии и гранулометрический состав продукта.

• Определение условий конверсии, обеспечивающих получение крупных агломератов фосфомела с высокой степенью конверсии, пригодных для использования в металлургической промышленности.

**Методы**

*Объект исследования.* Эксперименты проводились с модельными образцами на основе химически чистого $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Выбор модельных образцов в качестве объекта исследования позволил исключить влияние сопутствующих примесей ФГ и сосредоточиться на изучении закономерностей карбонатной конверсии в чистом виде. Также исследования свойств техногенных отложений в отвалах ФГ, сформированных при переработке фосфатного сырья различного происхождения, демонстрируют, что именно $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ является основной минеральной фазой в теле гипсонакопителей. Поскольку преобразования ФГ в теле отвала протекают по механизму гидратации, независимо от того, в какой форме (дигидратной или полугидратной) отход первоначально поступает на складирование, под воздействием атмосферных осадков и влажности воздуха происходит переход полуводного сульфата кальция в двуводный. Следовательно, использование именно дигидрата в качестве модельного соединения корректно с точки зрения перспектив утилизации как свежего, так и отвального ФГ.

*Реагенты.* В качестве карбонатного реагента применяли раствор $Na_2CO_3$ квалификации «х.ч.», приготовленный на дистиллированной воде. Выбор обусловлен результатами предварительных экспериментальных исследований, показавших, что использование $Na_2CO_3$ обеспечивает наилучшую совокупность показателей по выходу осадка, скорости фильтрации и крупности получаемого продукта по сравнению с $K_2CO_3$ [23].

Альтернативный реагент – $(NH_4)_2CO_3$ – известен как основа Мерзебургского процесса для получения $(NH_4)_2SO_4$. Однако в промышленной практике его применение сопряжено с серьезными техническими трудностями. В частности, при взаимодействии ФГ с аммиачным раствором часто происходит затвердевание реакционной суспензии, вызванное слишком быстрой кристаллизацией карбоната и (или) бикарбоната аммония, что делает невозможным дальнейшее перемешивание и фильтрацию, а решение этой проблемы усложняет аппаратурное оформление[1]. Кроме того, при высоких температурах, рассматриваемых в работе, термическая нестабильность $(NH_4)_2CO_3$ приводит к его интенсивному разложению и потерям аммиака [24]. Таким образом, для решения фундаментальной задачи управления крупностью осадка использование $Na_2CO_3$ является более надежным и методически корректным решением. Тем не менее, исследование аммонийного способа с фокусом на получение $(NH_4)_2SO_4$ как второго товарного продукта (ценного удобрения) представляет собой отдельную перспективную задачу.

Концентрацию карбонатного раствора $Na_2CO_3$ (КР) варьировали в диапазоне от 200 до 300 г/дм$^3$ с шагом 25 г/дм$^3$. Значения плотности растворов определяли расчетным методом с использованием

[1] *Toczek A., Merka W., Gosciniak P., Gosciniak M.* Patent № US 10919774 B2. Method for the management of phosphogypsum. Publ. 16.02.2021.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

линейных зависимостей, построенных по справочным данным[2]. Выбор диапазона концентраций КР обусловлен результатами стехиометрического расчета. При концентрациях менее 200 г/дм$^3$ не достигается необходимый избыток карбонат-ионов относительно $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, что приводит к неполному протеканию реакции и снижению степени конверсии; осадок при этом будет содержать значительное количество непрореагировавшего гипса. Верхняя граница диапазона (300 г/дм$^3$) выбрана исходя из растворимости $Na_2CO_3$.

*Используемое оборудование и методы исследования.* Экспериментальная часть работы выполнена на базе научных центров «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» и «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Исходные условия конверсии: концентрация КР, г/дм$^3$; отношение Ж:Т по массе; температура, °С; продолжительность контакта фаз, мин; скорость перемешивания, об/мин. Контролируемые свойства продуктов: выход осадка, % от массы $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; влажность осадка, %; выход фильтрата (сульфатного раствора, СР), % от объема КР; pH СР; скорость фильтрации пульпы, м$^3$/(м$^2$·ч); размер частиц осадка, мкм; степень конверсии, %. Принципиальная схема карбонатной конверсии ФГ представлена на рис.2.

Исследование подразумевает проведение серии однофакторных экспериментов, в каждом из которых варьируется только один из исходных параметров в рамках определенного базового диапазона. Остальные факторы фиксируются на усредненных значениях. Это позволяет изолированно оценить влияние каждого параметра на контролируемые свойства продуктов реакции. Базовые диапазоны ключевых факторов, влияющих на конверсию, были определены в ходе предварительных экспериментов [23]. В настоящем исследовании данные диапазоны были разбиты на равные интервалы для контроля изменений свойств продуктов конверсии.

Эксперименты проводили на мультиреакторной системе H.E.L. Parallel Reactor (Великобритания). В реактор загружали расчетное количество карбонатного раствора, нагревали до требуемой температуры (диапазон 40-105 °С, шаг 10-15 °С), после чего вносили навеску $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Соотношение жидкой и твердой фаз по массе варьировали от 2 до 10.

Реакционную смесь термостатировали при постоянном перемешивании (скорость 400 об/мин) в течение заданного времени (от 30 до 180 мин). Скорость перемешивания была выбрана на основе предварительных экспериментов как заведомо достаточная для снятия внешнедиффузионных ограничений; дополнительная проверка влияния перемешивания на скорость процесса подтвердила отсутствие значимых изменений при увеличении скорости до 600 об/мин [24].




Рис.2. Принципиальная схема карбонатной конверсии ФГ

1 – вторичный материальный ресурс; 2 – полупродукты; 3 – сырье; 4 – товарные продукты

[2] База данных. Термические константы веществ (рабочая версия 2). URL: https://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html (дата обращения 30.03.2026).



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

По окончании процесса пульпу подвергали вакуумному фильтрованию на воронке Бюхнера с использованием вакуумного насоса НВМ 2×2 (Россия) при постоянном давлении 99 кПа. Объем полученного фильтрата (сульфатного раствора $Na_2SO_4$) фиксировали мерным цилиндром, значение pH определяли потенциометрическим методом на стационарном pH-метре HANNA HI 2210-02 (Германия). После фильтрации выполнялась сушка осадка при температуре 105 °C в сушильном шкафу Binder ED 400 (Германия).

*Определение скорости фильтрации.* Скорость фильтрации пульпы определяли по стандартной методике как отношение объема фильтрата к произведению площади фильтра и времени фильтрации после фиксации прохождения заданного объема промывных вод через слой осадка известной толщины при постоянном давлении вакуумного насоса. Для оценки фильтруемости пульпы использовали классификацию, согласно которой пульпы со скоростью фильтрации менее 1,5 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ относятся к труднофильтруемым, более 1,5 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ – к легкофильтруемым.

*Определение гранулометрического состава.* Перед анализом методом лазерной дифракции на анализаторе размеров частиц «Микросайзер 201С» (Россия) пробы подвергали ультразвуковой обработке в течение 2 мин для разрушения агломератов; в качестве дисперсионной среды использовали 0,1 %-ный раствор гексаметафосфата натрия в соответствии с руководством по эксплуатации прибора. Данный подход является стандартным для дезагрегации тонкодисперсных карбонатных материалов и широко применяется в минерально-сырьевой отрасли как метод физического диспергирования кальцита, апатита и других минералов, не приводящий к образованию новых фаз [25] ввиду крайне низкой концентрации раствора, малого объема дозирования и минимального времени контакта. Результаты измерений представляли в виде интегральных кривых распределения с определением параметров $D50$ и $D90$ – диаметров, ниже которых находятся 50 и 90 % частиц соответственно. Для визуальной оценки морфологии частиц и подтверждения данных лазерной дифракции использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Vega 3 LMH (Чехия); перед съемкой образцы напыляли углеродным проводящим покрытием на установке Q150R E.

*Определение степени конверсии.* Химический состав исходного сырья и продуктов конверсии контролировали методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на рентенофлуоресцентном спектрометре Epsilon 3 (Нидерланды). Степень конверсии $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ в $CaCO_3$ ($E$, %) оценивали по остаточному содержанию серы в осадке ($C_S$, %). Выбор серы в качестве маркерного элемента обусловлен тем, что она входит только в состав исходного реагента, следовательно, уменьшение ее массовой доли в продукте напрямую отражает полноту протекания реакции.

Содержание серы определяли сравнением интенсивности аналитического сигнала исследуемого образца с сигналом образца сравнения – химически чистого гипса с известным содержанием серы (18,62 %). Градуировочная зависимость, построенная по расчетным данным для смесей $CaCO_3$ и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ с различным соотношением компонентов, описывается линейным уравнением

$$E = -5{,}3694 C_S + 100.$$

Поскольку точки на градуировочном графике являются расчетными, а не экспериментальными, коэффициент детерминации $R^2$ составил 1,00. При практическом применении методики относительная погрешность определения серы методом РФА не превышала 7 %, что учитывалось при интерпретации результатов.

*Кинетические исследования.* Для обоснования вывода о смене лимитирующей стадии при повышенных температурах проведены дополнительные эксперименты при температурах 80, 90 и 100 °C с фиксацией степени конверсии в интервале времени от 0,2 до 25 мин. По начальным участкам кинетических кривых рассчитывали мгновенные скорости реакции, на основе которых с использованием уравнения Аррениуса определяли кажущуюся энергию активации. Подробное изложение кинетических закономерностей является предметом отдельного исследования; в настоящей работе приведены лишь обобщенные данные, необходимые для интерпретации результатов.

*Планирование эксперимента и статистическая обработка.* Для повышения достоверности результатов каждое измерение выполняли не менее чем в трех повторностях, в качестве окончательного значения принимали среднее арифметическое. Полученные данные обработаны статистически с исключением выпадающих значений, выходящих за границы доверительного интервала ($p < 0{,}05$).



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

**Результаты**

В ходе экспериментальных исследований установлено, что все рассматриваемые факторы оказывают значимое влияние на степень конверсии $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и гранулометрический состав образующегося фосфомела, однако характер этого влияния различен. На рис.3 представлены изменения основных показателей процесса в зависимости от варьируемых параметров. За точку отсчета (условный ноль) приняты значения, полученные при минимальном уровне регулируемого фактора.

*Концентрация карбонатного раствора.* При фиксированных температуре 70 °С, соотношении Ж:Т = 5 и продолжительности 60 мин увеличение концентрации $Na_2CO_3$ с 200 до 300 г/дм$^3$ сопровождается ростом степени конверсии с 81,2 до 97,9 %. Наиболее интенсивное увеличение наблюдается в интервале 200-250 г/дм$^3$, где степень конверсии возрастает на 12 %. Дальнейшее повышение концентрации до 300 г/дм$^3$ дает прирост лишь 0,3 %, что находится в пределах погрешности метода.

Зависимость крупности продукта от концентрации носит экстремальный характер – значение *D*90 увеличивается с 19,2 мкм при 200 г/дм$^3$ до 30,5 мкм при 275 г/дм$^3$, однако при 300 г/дм$^3$ снижается до 26,5 мкм. Медианный диаметр *D*50 при этом изменяется незначительно – от 6,9 до 7,6 мкм с последующим снижением до 7,5 мкм. Скорость фильтрации пульпы достигает максимального значения 2,39 м$^3$/(м$^2$·ч) при концентрации 250 г/дм$^3$, тогда как при 300 г/дм$^3$ она снижается до 1,15 м$^3$/(м$^2$·ч).

*Температура* процесса оказывает наиболее существенное влияние на свойства продуктов. Исследования, выполненные при концентрации $Na_2CO_3$ 250 г/дм$^3$, Ж:Т = 5 и продолжительности 60 мин в диапазоне температур от 40 до 105 °С, показали, что степень конверсии возрастает с 93,7 % при 40 °С до 96,5 % при 105 °С. Однако ключевое значение имеет изменение гранулометрического состава. При температурах до 80 °С значение *D*90 стабилизируется на уровне 24,5-25,8 мкм. Повышение температуры до 95 °С приводит к росту этого показателя до 30,1 мкм, а при 105 °С – до 38,0 мкм.

Медианный диаметр *D*50 изменяется при этом не столь значительно – от 7,7 до 7,3 мкм, что указывает на преимущественное увеличение доли крупных частиц при сохранении основной массы продукта в области средних размеров. Кривые распределения частиц по размерам демонстрируют качественное изменение гранулометрического состава при переходе через 80 °С; если при низких температурах распределение является узким и одномодальным, то при 100 °С появляется выраженное плечо в области крупных размеров, а при 105 °С формируется второй максимум в области 40-60 мкм. Скорость фильтрации пульпы в исследованном диапазоне возрастает с 1,03 до 2,23 м$^3$/(м$^2$·ч).

*Соотношение жидкой и твердой фаз* (по массе) выступает фактором, определяющим как полноту протекания реакции, так и крупность ФМ. При фиксированных концентрации $Na_2CO_3$ 250 г/дм$^3$, температуре 70 °С и продолжительности 60 мин увеличение Ж:Т с 2 до 10 сопровождается ростом степени конверсии с 46,7 до 98,8 %. При недостатке жидкой фазы (Ж:Т = 2) степень конверсии не превышает 46,7 % и осадок представляет собой смесь непрореагировавшего гипса и карбоната кальция. Увеличение Ж:Т до 3,5 обеспечивает рост степени конверсии до 93,5 %, а при достижении соотношения 4,5 и выше этот показатель стабилизируется на уровне 98,3-98,8 %.

Крупность ФМ демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению во всем исследованном диапазоне – *D*90 возрастает с 24,4 мкм при Ж:Т = 2 до 35,8 мкм при Ж:Т = 5 и достигает 42,6 мкм при максимальном соотношении Ж:Т = 10. Медианный диаметр *D*50 при этом увеличивается с 6,2 до 7,9 мкм. Скорость фильтрации пульпы изменяется немонотонно: при увеличении Ж:Т с 2 до 5 наблюдается ее снижение с 2,39 до 1,41 м$^3$/(м$^2$·ч), что связано с возрастанием доли мелких частиц ФМ по мере увеличения степени конверсии. При дальнейшем увеличении соотношения до 10 скорость фильтрации возрастает до 3,17 м$^3$/(м$^2$·ч), что коррелирует с ростом крупности агломератов и снижением вязкости пульпы вследствие разбавления.

*Продолжительность контакта фаз* оказывает различное влияние на степень конверсии и крупность ФМ. Исследования, проведенные при концентрации $Na_2CO_3$ 250 г/дм$^3$, температуре 70 °С и Ж:Т = 5, показали, что степень конверсии с увеличением времени от 30 до 180 мин выросла незначительно – с 95,3 до 98,6 %, причем основной прирост (до 97,3 %) пришелся на первые 60 мин. Это указывает на высокую скорость реакции уже на начальном этапе конверсии. Крупность



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 90-104
© Д.В.Сучков, Т.Е.Литвинова, А.П.Лебедев, 2026

ФМ оказалась более чувствительной к изменению продолжительности процесса. За первые 30-60 мин *D*90 увеличился с 30,5 до 33,4 мкм, а к 180 мин достиг 42,6 мкм. Особенно заметен прирост доли частиц крупнее 30 мкм при продолжительности процесса свыше 120 мин.

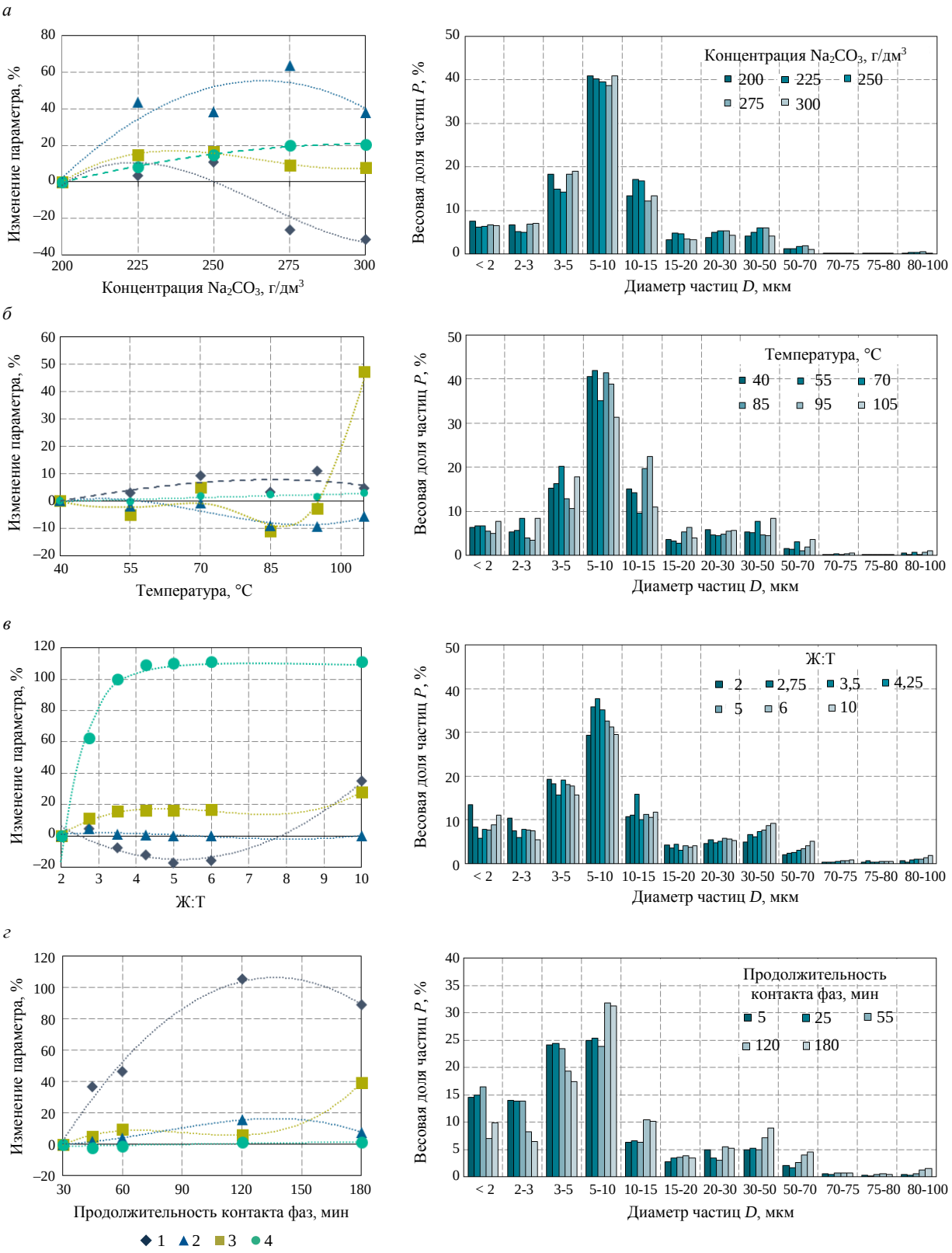



Рис.3. Изменения основных показателей процесса в зависимости от варьируемых параметров:
*а* – влияние концентрации $Na_2CO_3$; *б* – влияние температуры конверсии;
*в* – влияние соотношения жидкой и твердой фаз; *г* – влияние продолжительности контакта фаз
1 – скорость фильтрации; 2 – крупность *D*50; 3 – крупность *D*90; 4 – степень превращения


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Медианный диаметр *D*50 при этом увеличивается с 6,7 до 7,2 мкм. Характер изменения гранулометрических параметров (рост *D*90 при незначительном изменении *D*50) указывает на то, что увеличение продолжительности процесса способствует преимущественно агломерации первичных кристаллов, а не их росту. Скорость фильтрации пульпы возрастает пропорционально увеличению крупности агломератов, при $\tau$ = 30 мин она составляет 1,03 $м^3/(м^2 \cdot ч)$, при $\tau$ = 120 мин – 2,23 $м^3/(м^2 \cdot ч)$, при $\tau$ = 180 мин – 2,39 $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

*Кинетические исследования*, выполненные при температурах 80, 90 и 100 °С, показали, что степень конверсии достигает 90-93 % уже в первую минуту контакта фаз, что свидетельствует о высокой скорости реакции. На основе анализа температурной зависимости начальной скорости реакции рассчитана кажущаяся энергия активации процесса 89,9 кДж/моль.

**Обсуждение результатов**

Экспериментальные данные демонстрируют возможность управления гранулометрическим составом химически осажденного $CaCO_3$ за счет целенаправленного изменения условий реакции. При этом каждый из рассматриваемых факторов оказывает специфическое влияние на механизм формирования частиц и на степень конверсии.

*Полиморфизм $CaCO_3$.* В системе $CaSO_4 \cdot 2H_2O$–$Na_2CO_3$–$H_2O$ на начальном этапе может образовываться аморфный карбонат кальция или его метастабильные полиморфные модификации (ватерит, арагонит). Тем не менее, во всех экспериментах осадок представлен кальцитом. Это согласуется с литературными данными о быстрой перекристаллизации метастабильных фаз в условиях повышенных температур и высоких пересыщений и подтверждается данными рентгенофазового анализа с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (Япония). Метастабильные модификации не зафиксированы, что может быть связано с их быстрой перекристаллизацией в условиях эксперимента. Образование кальцита, имеющего ромбоэдрическую форму, способствует формированию плотных агломератов, наблюдаемых на СЭМ-изображениях, полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа Vega 3 LMH.

*Анализ влияния концентрации карбонатного раствора*. Выявленная зависимость степени конверсии и крупности продукта от концентрации карбонатного раствора согласуется с общими представлениями о влиянии пересыщения на процессы кристаллизации. Увеличение концентрации $Na_2CO_3$ до 250-275 $г/дм^3$ повышает движущую силу реакции, что способствует как росту степени конверсии, так и укрупнению образующихся частиц. Однако снижение *D*90 при концентрации 300 $г/дм^3$ (при практически неизменном *D*50) позволяет сделать вывод о конкуренции процессов зародышеобразования и агломерации. При концентрациях, близких к насыщению, пересыщение по $CaCO_3$ становится экстремально высоким, что смещает баланс в сторону гомогенного зародышеобразования. Образующееся огромное число первичных частиц малого размера затрудняет формирование крупных агломератов. Таким образом, при 300 $г/дм^3$ доминирующим становится механизм массового зародышеобразования, подавляющий агломерацию, что отрицательно сказывается на результирующих показателях размера частиц.

*Анализ влияния температуры*. Наиболее существенное влияние на крупность ФМ оказывает температура проведения конверсии. Рост *D*90 при повышении температуры до 90-100 °С и качественное изменение гранулометрических кривых (появление второго максимума в области крупных размеров без существенного изменения *D*50) свидетельствуют о смене механизма, определяющего формирование частиц. Можно предположить, что высокая скорость реакции при температурах более 80 °С приводит к образованию большого количества мелких первичных кристаллов, которые затем формируют более крупные агломераты.

Кажущаяся энергия активации, рассчитанная по начальным участкам кинетических кривых, составила 89,9 кДж/моль. Это заметно выше показателей, характерных для диффузионно-контролируемых процессов (8-37 кДж/моль) [26, 27]. В совокупности с отсутствием влияния увеличения скорости перемешивания на степень конверсии это позволяет предполагать, что лимитирующей стадией реакции, лежащей в основе конверсии, может быть либо собственно химическая реакция, либо внутренняя диффузия в порах формирующихся агломератов. Окончательный ответ на этот вопрос требует более детальных кинетических экспериментов.

*Анализ влияния соотношения жидкой и твердой фаз* подтверждает необходимость проведения процесса в условиях избытка $CO_3^{2-}$. При Ж:Т менее 3,5 степень конверсии не превышает 76 %,



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

что обусловлено ограничениями массообмена и снижением подвижности ионов в концентрированных суспензиях. При увеличении Ж:Т до 4,5 и выше достигаются максимальные значения степени конверсии (98,3-98,8 %).

Немонотонный характер изменения скорости фильтрации при увеличении Ж:Т требует отдельного анализа. Снижение скорости фильтрации в интервале Ж:Т от 2 до 5 (с 2,39 до 1,41 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ обусловлено двумя факторами. При Ж:Т = 2 осадок содержит значительное количество непрореагировавшего гипса, крупные кристаллы которого формируют рыхлую, пористую структуру, что делает пульпу легкофильтруемой. Однако по мере увеличения Ж:Т растет и степень конверсии, что приводит к увеличению в осадке доли мелких частиц $CaCO_3$, которые снижают скорость фильтрации. При Ж:Т = 10 уже происходит формирование крупных агломератов $CaCO_3$, а вязкость пульпы снижается за счет разбавления. Все это ведет к улучшению условий фильтрования и значительному росту скорости фильтрации до 3,17 $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

*Анализ влияния продолжительности контакта фаз*. Проведение конверсии в течение 120 мин и более приводит к заметному росту *D*90, однако *D*50 практически не меняется. Подобный рост доли крупных фракций при сохранении размера первичных частиц характерен для преобладания процессов агломерации, а не классического созревания Оствальда (увеличения среднего размера и сужения распределения). С практической точки зрения образование устойчивых крупных агломератов $CaCO_3$ выгодно, поскольку, как было отмечено, они обеспечивают улучшение условий фильтрования и удобны для дальнейшей транспортировки и переработки продукта.

*Перспективы использования фосфомела*. В технологическом процессе карбонатной конверсии ФГ можно выделить основные стадии, описанные на рис.4. При этом карбонатный раствор $M_2CO_3$ может быть получен с использованием $CO_2$-содержащих дымовых газов в качестве источника карбонат-иона методом абсорбции гидроксида одноименного иона MOH (способ 1), либо путем растворения твердого карбоната $M_2CO_3$ (способ 2).

Достижение крупности *D*90 = 45 мкм является ключевым показателем, поскольку обеспечивает высокую скорость фильтрации пульпы (3,17 $м^3/(м_2 \cdot ч)$. Легкофильтруемая пульпа, в свою очередь, в рамках технологического процесса снижает затраты энергии на обезвоживание, что делает

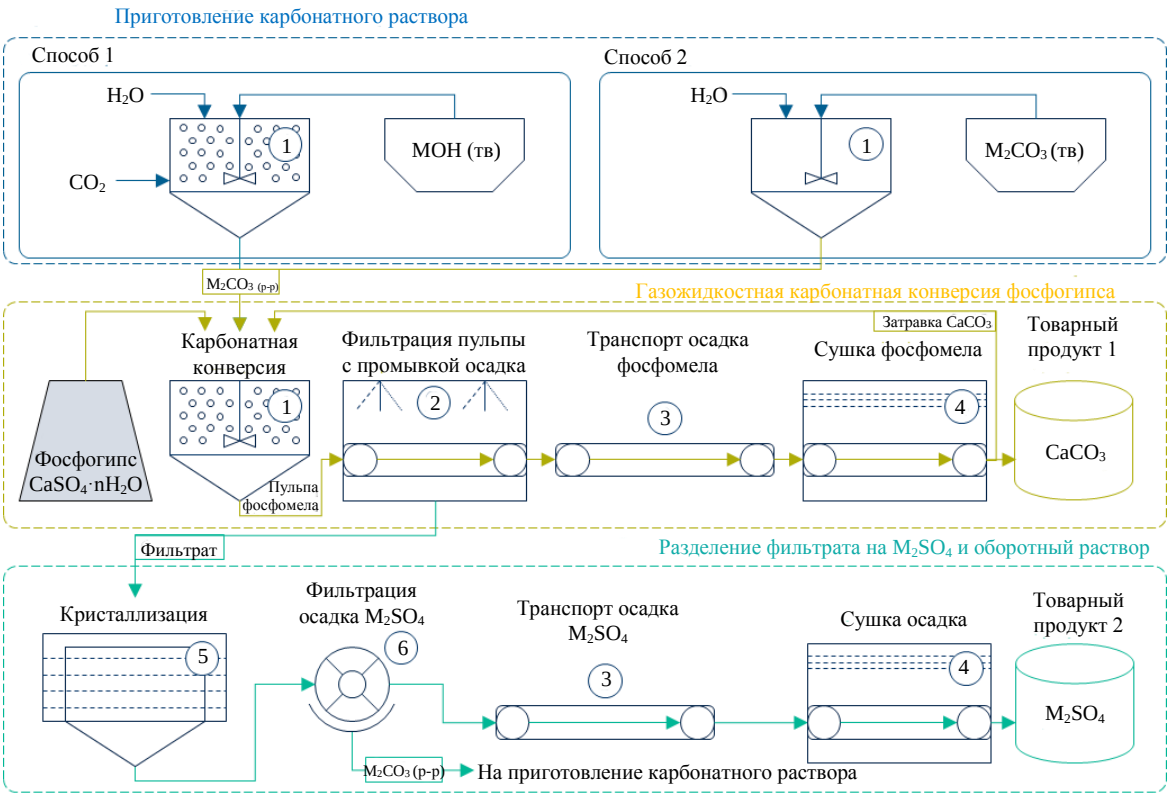



Рис.4. Структурная блок-схема технологического процесса карбонатной конверсии ФГ

1 – реактор-смеситель; 2 – вакуум-фильтр ленточный с промывкой осадка; 3 – конвейер ленточный; 4 – сушилка ленточная; 5 – реактор-кристаллизатор с охлаждением; 6 – вакуум-фильтр



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

конверсию более рентабельной. Кроме того, утилизация ФГ предложенным способом открывает возможность вовлекать в переработку значительные объемы вновь образующихся и уже размещенных отходов, что предотвращает дальнейшее загрязнение окружающей среды в зоне влияния гипсонакопителей.

Следует подчеркнуть, что представленные результаты определены для модельной системы. Они могут служить основой для разработки технологии переработки гипсосодержащих отходов, однако присутствие в фосфогипсе примесей (оксидов алюминия, железа, кремния, фосфора, фторидов, редкоземельных элементов) может влиять на кинетику процесса и свойства продукта, что требует дополнительных исследований на реальных образцах [28].

Присутствие фторид-ионов способно влиять на ход карбонатной конверсии за счет взаимодействия фторидов с карбонатом кальция, что может приводить к образованию труднорастворимых соединений на поверхности частиц, замедляя массообмен и снижая степень конверсии. При этом вторичные продукты реакции (фторид кальция) могут изменять фильтрационные свойства пульпы и влиять на чистоту конечного продукта.

В литературе отмечается, что реологическое поведение суспензий карбоната натрия и фосфогипса сильно зависит от температуры, времени и концентрации реагентов, а в промышленных условиях достижение высокой степени конверсии (93-96 %) занимает больше времени (30 мин), чем в модельных [29]. Таким образом, перенос оптимальных параметров, определенных в ходе исследования, на производственные условия требует дополнительных экспериментов непосредственно с промышленными образцами фосфогипса, включая оценку влияния примесей на кинетику, степень конверсии и морфологию продукта.

Наличие примесей в фосфомеле ограничивает возможность применения продукта в производствах, требующих высокой чистоты карбоната кальция, однако не является критичным для металлургической отрасли. В производстве агломерата и выплавке чугуна флюсы на основе карбоната кальция традиционно содержат значительные количества оксидов кремния, алюминия и других элементов, причем их содержание нормируется лишь в определенных пределах[3]. Полученный продукт с крупностью частиц до 45 мкм не требует дополнительного измельчения и может быть непосредственно использован в агломерационном производстве, где, согласно техническим условиям, требуется содержание фракции менее 3 мм не менее 95 %. Использование техногенного ФГ как источника сырья для производства флюса позволяет реализовать принципы ресурсосбережения и циркулярной экономики. Замещение природного известняка техногенным фосфомелом снижает нагрузку на экосистемы, связанную с разработкой карьеров, и сокращает объемы размещения ФГ, что в совокупности обеспечивает двойной экологический эффект. Данный подход согласуется с современными исследованиями, демонстрирующими перспективность переработки различных видов техногенного сырья [30-32].

*Оценка эколого-экономической эффективности* предлагаемого технического решения выполнена с применением комплекса методов технико-экономического, рыночного и эколого-экономического анализа. В основу расчетов положен метод прямого стоимостного сопоставления результатов и затрат, позволяющий определить коммерческий эффект от переработки фосфогипса в товарную продукцию, а также метод предотвращенного экологического ущерба, отражающий природоохранную значимость проекта.

При проектной мощности установки 32,4 тыс. т перерабатываемого ФГ в год выход товарного ФМ составит 19,1 тыс. т, сульфата натрия – 30,1 тыс. т. Проектная мощность установки принята исходя из удельной производительности стандартного ленточного вакуум-фильтра (0,5 т/(м$^2$·ч) по твердому веществу) и возможности размещения трех таких фильтров при непрерывном режиме работы.

При расчете экономической эффективности использованы консервативные значения цен: для технического карбоната кальция – 5900 руб./т, для сульфата натрия – 14900 руб./т (среднерыночная цена по данным аналитических обзоров за 2023-2024 гг.). Доход от реализации продукции составит 112,7 млн руб./год от фосфомела и 448,5 млн руб./год от сульфата натрия, суммарно 561,2 млн руб./год.

[3] Производство чугуна, стали и ферросплавов: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 26-2017. М.: Бюро НДТ, 2017. 478 с.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Капитальные вложения оценены на основе укрупненных нормативов стоимости оборудования для химической промышленности и включают затраты на приобретение реакторного оборудования, фильтров, сушилок, кристаллизаторов, систем аспирации, а также затраты на транспортировку, монтаж и пусконаладочные работы (суммарно около 40 % от стоимости оборудования).

Экономический эффект, связанный с экономией на платежах за размещение отходов, составляет 0,64 млн руб./год. При среднегодовых эксплуатационных затратах в 125,04 млн руб./год (затраты на электроэнергию, воду, оплату труда, страховые взносы, амортизацию и прочие расходы) годовой экономический эффект составит 416 млн руб. График окупаемости проекта и анализ чувствительности представлены на рис.5.

Следует отметить, что в рамках предпроектной оценки невозможно точно определить договорную цену реагента в условиях долгосрочного оптового контракта конкретного предприятия. На крупных химических комплексах, таких как АО «Апатит» (Череповец), имеется как собственная инфраструктура для приема и хранения многотоннажных реагентов, так и избыточный диоксид углерода – побочный продукт производства аммиака. При этом технология улавливания $CO_2$ из дымовых газов уже внедрена на предприятиях (например, метод химической абсорбции с применением растворов моноэтаноламина) и не требует дополнительных капиталовложений.

Данная технология также предусматривает стадию предварительной очистки дымовых газов от примесей, включая $SO_x$ и $NO_x$, что является стандартным решением для защиты абсорбционного

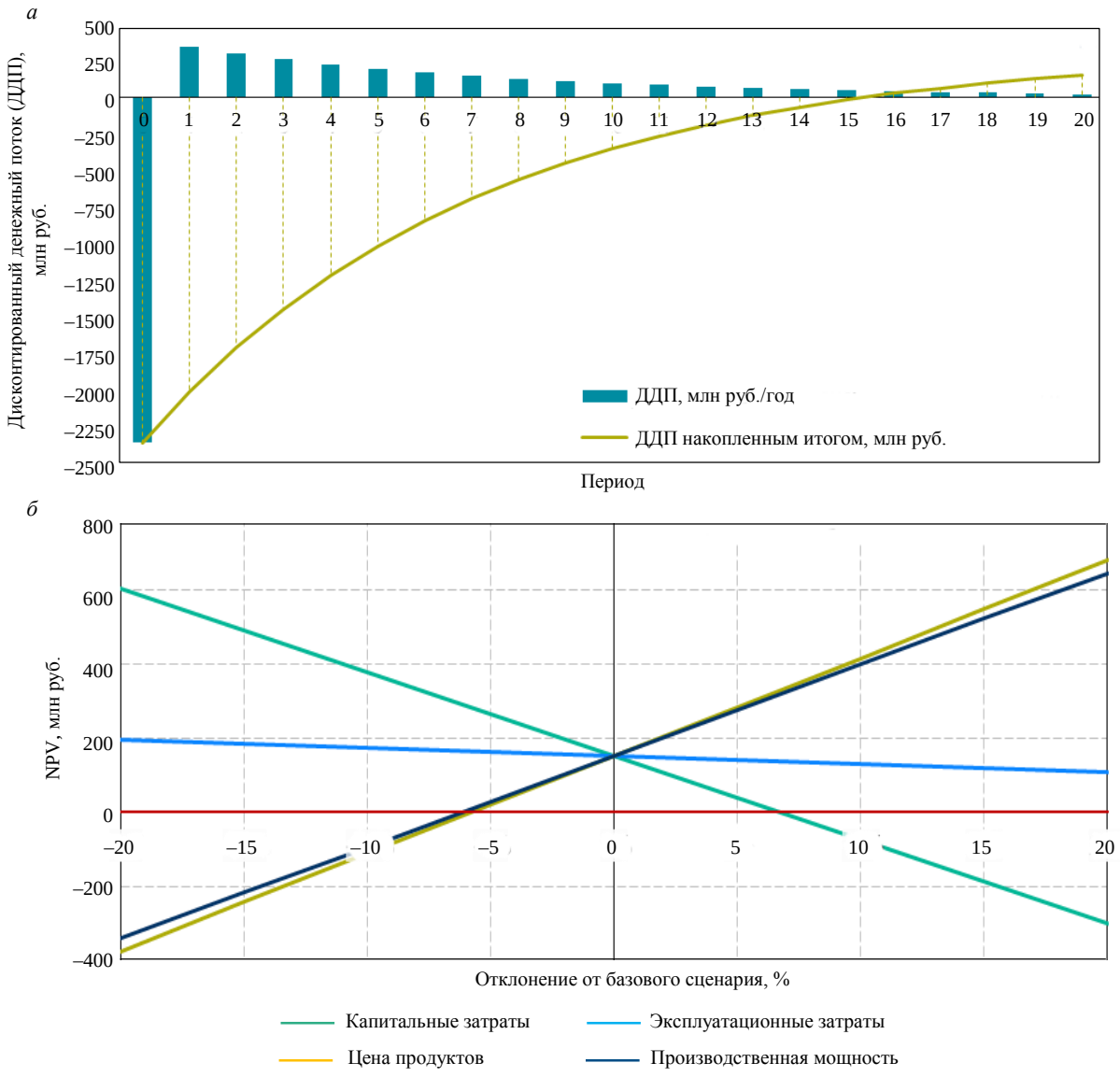



Рис.5. Результаты расчета экономической эффективности (*а*) и анализа чувствительности (*б*)



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

раствора от деградации[4]. Таким образом, в процесс карбонизации поступает поток $CO_2$, уже очищенный от соединений, способных повлиять на процесс конверсии.

Все это создает техническую возможность получения карбонатного раствора непосредственно на площадке путем абсорбции $CO_2$ раствором NaOH, что позволяет минимизировать затраты на приобретение товарного $Na_2CO_3$. Таким образом, в рамках принятой модели допускается, что итоговая стоимость реагента будет значительно ниже рыночной и сопоставима с доходом от реализации товарной продукции. В связи с этим, для целей настоящей предпроектной оценки, эксплуатационные материальные затраты по данной статье расходов не выделены отдельной строкой, что не влияет на итоговую величину чистого денежного потока в пределах принятой точности расчета. Детальный расчет маржинальности процесса требует уточнения конкретных условий на этапе рабочего проектирования.

Увеличение продолжительности процесса до 180 мин при температуре 90-100 °С, безусловно, влечет дополнительные энергозатраты на поддержание теплового режима реактора, что способствует росту эксплуатационных затрат. Тем не менее, указанная совокупность условий необходима для формирования крупных агломератов ФМ. Достижение такой крупности обеспечивает высокую скорость фильтрации пульпы, что сокращает затраты на стадии обезвоживания по сравнению с режимами, при которых формируется мелкодисперсный осадок. Комплексный эколого-экономический анализ подтверждает, что дополнительные энергозатраты не являются критическими: при горизонте планирования в 20 лет чистый дисконтированный доход (NPV) проекта равен 151,8 млн руб. Дисконтированный срок окупаемости (при величине капитальных вложений в 2,35 млрд руб.) составляет 16,3 лет, что является приемлемым показателем для природоохранных проектов. Таким образом, выбранная продолжительность процесса является оптимальной с точки зрения баланса между энергопотреблением и технологической эффективностью.

Анализ чувствительности показывает, что проект имеет наибольшую чувствительность к изменению цен на вторичное сырье (эластичность составляет 17,35), производственной мощности (16,23), а также к изменению величины капитальных затрат (–14,89). Проект наименее чувствителен к изменению эксплуатационных затрат – эластичность составляет всего –1,48. Таким образом, наиболее значимыми факторами риска для проекта выступают волатильность цен на товарную продукцию и достижение проектной мощности установки. Для снижения чувствительности рекомендуется заключение долгосрочных договоров на поставку вторичного сырья и резервирование мощностей на этапе проектирования. Умеренная зависимость от капитальных затрат подтверждает целесообразность использования типового оборудования и поэтапного ввода мощностей. Низкая чувствительность к эксплуатационным расходам свидетельствует о стабильности операционной деятельности при изменении текущих издержек.

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения земель оценивается в 40 млн руб./год.

Дополнительным экологическим преимуществом является возможность использования $CO_2$-содержащих дымовых газов для приготовления карбонатного раствора [33, 34], позволяющая связать до 0,84 т $CO_2$ на каждую тонну перерабатываемого отхода. В более широком контексте предлагаемое техническое решение отвечает принципам устойчивого развития, поскольку обеспечивает переход от практики длительного складирования фосфогипса к модели циркулярной экономики, в которой отход рассматривается как вторичный минеральный ресурс [35]. Такая схема не только снижает нагрузку на земельные ресурсы и уменьшает долгосрочные экологические риски, но и сокращает потребность в первичном сырье за счет возврата кальций- и серосодержащих компонентов в хозяйственный оборот. Современные исследования показывают, что варианты ресурсной переработки фосфогипса по сравнению со складированием характеризуются более благоприятными экологическими и экономическими показателями по результатам оценки жизненного цикла, а интеграция $CO_2$-минерализации и выпуска нескольких товарных продуктов усиливает климатический и ресурсосберегающий эффект технологии [36, 37]. Следовательно, внедрение рассматриваемого решения способствует достижению целей устойчивого развития (ЦУР), прежде всего ЦУР 9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура» и ЦУР 12 «Ответственное

[4] Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 2-2019. М.: Бюро НДТ, 2019. 825 с.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

потребление и производство», а за счет связывания диоксида углерода и снижения эмиссионной нагрузки также соответствует задачам климатической повестки ЦУР 13 «Борьба с изменением климата» [38, 39].

Таким образом, выполненные исследования подтверждают принципиальную возможность управления гранулометрическим составом ФМ, получаемого при карбонатной конверсии ФГ, и позволяют рекомендовать определенный диапазон технологических параметров для достижения заданной крупности продукта. Установлено, что формирование крупных частиц происходит преимущественно по механизму агломерации первичных кристаллов, а не их роста, что имеет важное значение для понимания процессов структурообразования и разработки практических рекомендаций. Полученные результаты создают основу для создания технологической схемы переработки техногенного гипсосодержащего сырья, ориентированной на получение продукции, востребованной в металлургической отрасли.

**Заключение**

В ходе исследования определены условия карбонатной конверсии фосфогипса, позволяющие получать фосфомел с заданными свойствами крупности при высокой степени конверсии исходного сырья.

Обоснована принципиальная возможность снижения техногенной нагрузки от объектов размещения ФГ путем переработки отхода в востребованный вторичный ресурс – фосфомел. Доказано, что необходимым условием экологической и экономической эффективности такой переработки является управление крупностью продукта, достигаемое варьированием технологических параметров. Наиболее существенное влияние на свойства продукта оказывают концентрация карбонатного раствора, температура, массовое соотношение Ж:Т и продолжительность контакта фаз.

При этом зависимость размера частиц $CaCO_3$ от концентрации $Na_2CO_3$ носит экстремальный характер: увеличение концентрации до 275 г/дм$^3$ способствует росту $D90$, однако дальнейшее повышение приводит к снижению этого показателя при практически неизменном $D50$. Степень конверсии более 98 % обеспечивается только при Ж:Т не менее 4,5. При недостатке жидкой фазы не обеспечивается полнота протекания реакции – осадок представляет собой смесь непрореагировавшего гипса и карбоната кальция. Дальнейшее увеличение Ж:Т не только решает эту проблему, но и способствует укрупнению агломератов $CaCO_3$, тем самым улучшая фильтрационные характеристики пульпы. Аналогичное влияние на агломерацию $CaCO_3$ оказывает и увеличение продолжительности контакта фаз.

На основе серии экспериментов установлено, что максимальная крупность ФМ ($D90$ = 45 мкм) и степень конверсии (98,8 %) достигаются при следующих условиях: концентрация карбонатного раствора $Na_2CO_3$ 250 г/дм$^3$, температура 90-100 °С, массовое соотношение Ж:Т = 10, продолжительность контакта фаз 180 мин. Получение устойчивых, крупных агломератов $CaCO_3$ при этом обеспечивает высокую скорость фильтрации пульпы (3,17 м$^3$/(м$^2$·ч). Удельный выход товарного продукта – фосфомела – составляет 0,59 т на 1 т исходного сырья.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Торочков Е.Л., Ряшко А.И.* Вторичные ресурсы, образующиеся в химической промышленности // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. М.; СПб: Реноме, 2019. С. 801-821.

2. *Smirnov Y.D., Ivanov A.V.* Investigation of Dust Transfer Processes During Loading and Unloading Operations Using Software Simulation // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 4. P. 29-33. DOI: 10.12911/22998993/86146

3. *Pratap B., Mondal S., Rao B.H.* Mechanical and durability analysis of geopolymer concrete incorporating bauxite residue, phosphogypsum, and ground granulated blast slag // Asian Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 25. Iss. 1. P. 317-326. DOI: 10.1007/s42107-023-00777-0

4. *Awad S., Essam M., Boukhriss A. et al.* Properties, Purification, and Applications of Phosphogypsum: A Comprehensive Review Towards Circular Economy // Materials Circular Economy. 2024. Vol. 6. № 9. DOI: 10.1007/s42824-024-00100-5

5. *Pliaka M., Gaidajis G.* Potential uses of phosphogypsum: A review // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2022. Vol. 57. Iss. 9. P. 746-763. DOI: 10.1080/10934529.2022.2105632

6. *Борисова Д.Д., Пашкевич М.А., Матвеева В.А.* Использование затравочных материалов для очистки сточных дренажных вод от ионов фтора // Обогащение руд. 2025. № 3. С. 43-49. DOI: 10.17580/or.2025.03.08

7. *Петрова Т.А., Епишина А.Д.* Оценка негативного воздействия рассолов калийных производств на почвенный покров путем моделирования процесса их разлива в естественных условиях // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 2 (64). С. 616-626. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-616-626



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

8. *Петров Д.С., Данилов А.С.* Гидрохимическая характеристика и экологическое состояние водных экосистем в зоне влияния предприятия по производству минеральных удобрений // Горный журнал. 2023. № 9. С. 83-88. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.12

9. *Bouargane B., Laaboubi K., Biyoune M.G. et al.* Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2023. Vol. 25. Iss. 3. P. 1288-1308. DOI: 10.1007/s10163-023-01617-8

10. *Saadaoui E., Ghazel N., Ben Romdhane C., Massoudi N.* Phosphogypsum: potential uses and problems – a review // International Journal of Environmental Studies. 2017. Vol. 74. Iss. 4. P. 558-567. DOI: 10.1080/00207233.2017.1330582

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

12. *Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H.* Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 4. № 1575. DOI: 10.3390/app11041575

13. *Solovyova V.M., Ilinova A.A.* Complex use of mineral raw materials: formation of organizational and economic mechanism // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 06012. DOI: 10.1051/e3sconf/202126606012

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

15. *Mattila H.-P., Zevenhoven R.* Mineral Carbonation of Phosphogypsum Waste for Production of Useful Carbonate and Sulfate Salts // Frontiers in Energy Research. 2015. Vol. 3. № 48. DOI: 10.3389/fenrg.2015.00048

16. *Msila X., Billing D.G., Barnard W.* Capture and storage of $CO_2$ into waste phosphogypsum: the modified Merseburg process // Clean Technologies and Environmental Policy. 2016. Vol. 18. Iss. 8. P. 2709-2715. DOI: 10.1007/s10098-016-1157-4

17. *Ennaciri Y., Mouahid F.E., Bendriss A., Bettach M.* Conversion of phosphogypsum to potassium sulfate and calcium carbonate in aqueous solution // MATEC Web of Conferences. 2013. Vol. 5. № 04006. DOI: 10.1051/matecconf/20130504006

18. *Shang Qing Lu, Pei Qiang Lan, Su Fang Wu.* Preparation of Nano-$CaCO_3$ from Phosphogypsum by Gas–Liquid–Solid Reaction for $CO_2$ Sorption // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. Vol. 55. Iss. 38. P. 10172-10177. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02551

19. *Цветков П.С.* Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного $CO_2$: экономия за счет совместной инфраструктуры // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 110-129.

20. *Stroykov G., Lebedev A., Belous A., Kolganova E.* Achieving Sustainable Development Goals Through Hybrid Energy Supply Systems in Mining: The Case of the Varvarinskoye Copper-Gold Deposit // Resources. 2026. Vol. 15. Iss. 2. № 25. DOI: 10.3390/resources15020025

21. *Литвинова Т.Е., Сучков Д.В.* Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 331-348. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331

22. *Teir S., Auvinen T., Said A. et al.* Performance of Separation Processes for Precipitated Calcium Carbonate Produced with an Innovative Method from Steelmaking Slag and Carbon Dioxide // Frontiers in Energy Research. 2016. Vol. 4. № 6. DOI: 10.3389/fenrg.2016.00006

23. *Литвинова Т.Е., Сучков Д.В., Герасев С.А.* Химически осажденный фосфомел ($CaCO_3$) как полезный продукт утилизации фосфогипса // Управление техносферой. 2023. Т. 6. Вып. 3. С. 435-450. DOI: 10.34828/UdSU.2023.70.83.010

24. *Avşar C., Tümük D., Ertunç S., Gezerman A.O.* A Review on Ammono-Carbonation Reactions: Focusing on the Merseburg Process // Chemical Review and Letters. 2022. Vol. 5. Iss. 1. P. 83-91. DOI: 10.22034/crl.2022.329067.1154

25. *Карапетян К.Г., Вершинина В.А.* Обзор применения гексаметафосфата натрия в различных областях промышленности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 149-156. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-4-149-156

26. *Agayr K., Chanouri H., Achiou B. et al.* Study on the kinetics of the conversion of Moroccan phosphogypsum into $X_2SO_4$ (X = Na, $NH_4$) // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2022. Vol. 24. Iss. 5. P. 2015-2029. DOI: 10.1007/s10163-022-01461-2

27. *Danielik V., Fellner P., Jurišová J., Králik M.* Kinetics of the conversion reaction of gypsum with ammonium carbonate // Chemical Papers. 2018. Vol. 72. Iss. 10. P. 2631-2639. DOI: 10.1007/s11696-018-0493-8

28. *Jiaojiao Hou, Zude Liu, Xiaoyang Ni.* Unlocking the mysteries: Investigating the kinetic mechanism of calcium carbonate formation from phosphogypsum // Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 182. P. 625-637. DOI: 10.1016/j.psep.2023.12.015

29. *Темиров Г.Б., Алимов У.К., Сейтназаров А.Р. и др.* Реологические характеристики и состав продуктов конверсии фосфогипса с карбонатом натрия // Российский химический журнал. 2023. Т. 67. № 3. С. 25-35. DOI: 10.6060/rcj.2023673.4

30. *Матвеева В.А., Чукаева М.А., Семенова А.И.* Получение смешанного коагулянта из отходов обогащения железной руды // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 433-443.

31. *Пашкевич М.А., Патокин Д.А., Данилов А.С.* Утилизация нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности с получением минеральных почвенных добавок // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 6. С. 10-17. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17

32. *Рудзиш Э., Петрова Т.А.* Оценка применимости осадка сточных вод в качестве добавки к почве для рекультивации земель, образованных при добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-2. С. 127-134 (in English). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_127

33. *Ennaciri Y., El Alaoui-Belghiti H., Bettach M.* Comparative study of $K_2SO_4$ production by wet conversion from phosphogypsum and synthetic gypsum // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. Iss. 3. P. 2586-2596. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.02.013

34. *Бажин В.Ю., Масько О.Н., Никитина Л.Н.* Декарбонизация отходящих газов промышленных металлургических печей // Металлург. 2023. № 9. С. 121-128. DOI: 10.52351/00260827_2023_09_121

35. *Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M.* Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 24. № 9376. DOI: 10.3390/en15249376

36. *Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V. et al.* 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



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

37. *Lu Chen, Xiaoyu Luan, Feng Han et al.* Life cycle environmental and economic assessment of Phosphogypsum utilization in China // Resources, Conservation and Recycling. 2025. Vol. 212. № 107938. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107938

38. *Yi Su, Yang Li, Wu Zhou et al.* A green integrated process for phosphogypsum recycling: $CO_2$ sequestration combined with $SO_2$ recovery // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 373. № 123707. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123707

39. *Ming-Sheng Du, Bo Long, Yi-Zhe Mei et al.* Toward zero-waste phosphogypsum valorization: Reengineered reverse-direct flotation synchronizes gypsum purification and functional co-products production // Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 517. № 164341. DOI: 10.1016/j.cej.2025.164341

***Авторы*: Денис Вячеславович Сучков,** *канд. техн. наук, старший преподаватель* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *suchkov_dv@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-5813-615X*, **Татьяна Евгеньевна Литвинова,** *д-р техн. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0133-3400*, **Андрей Павлович Лебедев,** *канд. экон. наук, старший преподаватель* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3651-3831*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*