

Научная статья

УДК 504.062.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-239-250

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ И МЕХАНИЗМА ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ЯИЧНОЙ СКОРЛУПЫ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СЫРЬЕВОГО РЕСУРСА

Будыкина Татьяна Алексеевна.

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия.

✉ **Соколов Леонид Иванович;**

Смирнова Ирина Михайловна.

**Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия**

✉ sokolovli@mail.ru

Аннотация. Кинетика и механизмы химических реакций, участвующих в разложении яичной скорлупы, изучаются с помощью экспериментальных (термогравиметрический анализ и дифференциальный термический анализ), а также теоретических моделей. Присутствие фазы кальцита в сырой яичной скорлупе и постепенное при обжиге образование из него оксида кальция подтверждено экспериментально. Рециклированная яичная скорлупа демонстрирует лучшую кристалличность по сравнению с товарным (коммерческим) карбонатом кальция. Обосновано, что яичная скорлупа может быть использована непосредственно в качестве катализатора, адсорбента и в качестве сырья для синтеза материалов с добавленной стоимостью, что позволяет снизить энергопотребление и минимизирует воздействие на природную среду за счёт рециклинга неизбежного отхода пищевой промышленности.

Ключевые слова: экологическая безопасность, ресурсосберегающие технологии, обращение с отходами, яичная скорлупа, кальцинирование, синхронный термический анализ, термогравиметрические кривые, дифференциально-сканирующая калориметрия

Для цитирования: Будыкина Т.А., Соколов Л.И., Смирнова И.М. Исследование кинетики и механизма термодеструкции яичной скорлупы как потенциального сырьевого ресурса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 239–250. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-239-250.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE KINETICS AND MECHANISM OF THERMAL DEGRADATION OF EGGSHELLS AS A POTENTIAL RAW MATERIAL RESOURCE

Budykina Tatiana A.

Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia.

✉ **Sokolov Leonid I.;**

Smirnova Irina M.

Russian state geological exploration university named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia

✉ sokolovli@mail.ru

Abstract. The kinetics and mechanisms of chemical reactions involved in the decomposition of eggshells are studied using experimental (thermogravimetric analysis and differential thermal analysis), as well as theoretical models. The presence of the calcite phase in the raw eggshell

and the gradual formation of calcium oxide from it during firing has been confirmed experimentally. Recycled eggshells demonstrate better crystallinity compared to commercial calcium carbonate. It is proved that eggshells can be used directly as a catalyst, adsorbent and as a raw material for the synthesis of value-added materials, which reduces energy consumption and minimizes the impact on the natural environment by recycling the inevitable waste of the food industry.

Keywords: eggshell, calcination, synchronous thermal analysis, thermogravimetric curves, differential scanning calorimetry

For citation: Budykina T.A., Sokolov L.I., Smirnova I.M. Investigation of the kinetics and mechanism of thermal degradation of eggshells as a potential raw material resource // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 239–250. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-239-250.

Введение

В данном исследовании в качестве потенциального сырьевого ресурса (природного сорбента) рассматривается яичная скорлупа. На сегодняшний день мировое производство яиц домашней птицы достигло 1 трлн 360 млрд яиц, что составляет порядка 91 млн метрических тонн, из которых 93 % приходится на куриные яйца. Лидером по объемам производства яиц является Китай (604,7 млрд шт.) – примерно 60 млн т (40 %). Следом идут Индия (114,4 млрд шт.), Индонезия (112,1 млрд шт.), США (111,6 млрд шт.), Бразилия (57,2 млрд шт.), Мексика (56,9 млрд шт) и на седьмом месте – Россия (46,7 млрд шт.) производит на одного человека 306 штук яиц. Лидерами по производству куриных яиц в России являются Приволжский (25 %) и Центральный федеральные округа (22 %). Доля яичной скорлупы и подскорлупной органической оболочки в структуре яйца составляет 10–12 % и 1,02 % соответственно [1, 2], что позволяет рассчитать, что в мире ежегодно производится 10,1 млн т яичной скорлупы и 918 тыс. т подскорлупной оболочки. Яичная скорлупа (минерализованный слой) содержит 95 % – 96 % минералов (90 % – 93,5 % CaCO_3) и 3,4 % органических веществ [3], фосфат кальция и карбонат магния – по 1 %. В незначительных количествах в скорлупе содержатся: сера, фосфор, молибден, железо, фтор. Всего в яичной скорлупе обнаружено 27 элементов таблицы Менделеева. Подскорлупная оболочка яичной скорлупы содержат 90 % белка, 3 % липидов, 2 % сахаров и небольшое количество минералов, таких как кальций и магний. Из 90 % присутствующих белков было идентифицировано 472 вида, среди них коллагены (типы I, V и X), а 70–75 % – другие белки и гликопротеины [4], в том числе: гликозаминогликаны (дерматансульфат, сульфат хондроитина); сульфатированные гликопротеины, в том числе гексозамины (глюкозамин); гиалуроновая кислота; сиаловая кислота; десмозин, изодесмозин, овотрансферрин, лизилоксидаза, лизоцим и β -N-ацетилглюкозаминидаза. Водорастворимый коллаген из внутренней оболочки скорлупы является наиболее распространенным (10 %) и может применяться для производства увлажняющей косметики, а высокое содержание кератина в клетках эктодермы может использоваться для производства средств для заживления ран и кремов для кожи [5–7]. Особая физическая структура яичной скорлупы с дисульфидными связями между молекулами белка и внутри них делает её труднорастворимой: максимальная степень растворимости составляет всего 62 %. По своей физической структуре яичная скорлупа состоит из слоя мембранных волокон, которые обладают определенными адсорбционными свойствами из-за своей пористости [8] и могут использоваться для адсорбции и извлечения ионов тяжёлых металлов из сточных вод. Поры яичной скорлупы используются в качестве носителей катализатора, применяемого в производстве биодизельного топлива.

С инженерной и биомедицинской точки зрения [9, 10] CaCO_3 и CaO являются незаменимыми материалами. В качестве адсорбента ядовитых материалов CaO считается эффективным компонентом на металлической основе для улавливания углерода. Оксид кальция является также основным компонентом силикатов кальция, которые используются в портландцементе и в качестве основного материала при производстве светодиодов белого света (LED). Другим заметным применением CaO является в стеклоделии CaO – ключевой компонент силикатных, боратных и фосфатных стекол для оконного стекла, биостекла и других линейных и нелинейно-оптических стекол. Силикатные, боратные и фосфатные стёкла играют ключевую роль в технологии безопасного захоронения ядерных отходов. Таким образом, яичную скорлупу следует признать альтернативным источником CaO и CaCO_3 для производства различных материалов с добавленной стоимостью. CaCO_3 и CaO , полученные из скорлупы, применимы при изготовлении клеев, герметиков, красок, бумаги, цементов и строительных материалов [11]. Поскольку известняк является невозобновляемым природным ресурсом, использование возобновляемых отходов яичной скорлупы в качестве альтернативного источника карбоната кальция может снизить негативное воздействие на природные запасы известняка.

Гипотеза исследования: можно предположить, что оптимизация режимов термической обработки (температура, время) и предварительная модификация ультразвуком яичной скорлупы как отхода пищевой промышленности позволит существенно снизить энергетические затраты на ее переработку в высокочистый оксид и карбонат кальция с улучшенными структурными и адсорбционными свойствами, что сделает процесс рециклинга экономически и экологически целесообразным.

Объект исследования: яичная скорлупа – неизбежный отход пищевой промышленности и домашних хозяйств.

Предмет исследования: технологический процесс термической обработки отходов яичной скорлупы.

Цель: Исследование кинетики и механизма термического разложения яичной скорлупы для научного обоснования оптимальных низкотемпературных параметров её переработки в целевые продукты (CaO , CaCO_3) с целью снижения энергопотребления и минимизации воздействия на окружающую среду.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Провести термический анализ (ТГ/ДТГ/ДСК) немодифицированных образцов яичной скорлупы для установления основных характеристик процесса её деструкции: температур начала и окончания разложения, скоростей потери массы, тепловых эффектов.
2. Исследовать влияние предварительной ультразвуковой и термической модификации образцов скорлупы на кинетику и механизм их последующего термического разложения.
3. Определить оптимальный температурный интервал (550–600 °C) и продолжительность прокаливания, обеспечивающие максимальный выход целевого продукта (CaO) и полноту разложения органической составляющей.
4. Количественно оценить выход продуктов термического разложения (зольность) и содержание растворимых форм соединений кальция в полученных образцах в зависимости от температуры обработки.
5. Провести сравнительный анализ эффективности предложенного низкотемпературного метода переработки яичной скорлупы с существующими высокотемпературными аналогами и обосновать его экологические и экономические преимущества.

Научная новизна работы заключается в комплексном экспериментальном и аналитическом исследовании кинетики и механизма низкотемпературного термического разложения яичной скорлупы с целью оптимизации процесса ее переработки в ценные продукты (CaO , CaCO_3). Конкретно новизна проявляется в:

- установлении конкретных температурных параметров и кинетических характеристик (температура начала деструкции – $405\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная скорость разложения – $17,0\text{ }\%/ \text{мин}$ при $544\text{ }^{\circ}\text{C}$) процесса кальцинации яичной скорлупы, что позволяет существенно снизить энергозатраты (до $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с традиционными процессами получения оксида кальция из известняка ($\sim 1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- экспериментальном подтверждении двухступенчатого механизма термодеструкции, включающего дегидратацию и разложение органических компонентов с последующим разложением карбоната кальция;

- разработке и исследовании эффективности модификации сырья предварительной ультразвуковой обработкой, которая приводит к значительному увеличению выхода целевого продукта (зольность модифицированного образца составила $99,3\text{ }\%$ против $28,3\text{ }\%$ у немодифицированного);

- сравнительном анализе свойств полученных продуктов с коммерческими аналогами, выявившем лучшую кристалличность рециклированного карбоната кальция из яичной скорлупы.

Материалы и методы

Яичная скорлупа была собрана в столовой детского сада МАДОУ «Детский сад № 22 «Ласточка», расположенного в г. Вологде, Россия. В детский сад закупку яиц осуществляет МАУ «Центр социального питания», поставка яиц производится с птицефабрики СХПК «Даниловская птицефабрика» Ярославская обл. (Россия). В эксперименте использовались следующие вещества и реактивы (Россия): серная кислота (хч); фосфорная кислота (хч); 1,5-дифенилкарбазид (чда); ацетон (чда); трилон Б стандарт-титр $0,1\text{ моль/дм}^3$ ($0,1\text{ н}$); хромовый темно-синий индикатор (чда); гидроксид аммония (чда); хлорид аммония (ч); этанол $95\text{ }\%$. Все реактивы были аналитически чистыми и использовались при оценке содержания растворимых форм соединений кальция после прокаливания и ультразвуковой обработки по утверждённым методикам (ГОСТ 27753.9–88 «Грунты тепличные. Методы определения водорастворимых кальция и магния»).

При выполнении работы использовали следующие методы анализа: систематизация, анализ и синтез, обобщение. При выполнении эксперимента применяли физико-химические методы анализа: гравиметрия, фотоэлектроколориметрия, титриметрия, термогравиметрия.

Приготовление образцов для исследования

Первоначально готовились образцы яичной скорлупы (немодифицированный и модифицированный), используемые в исследовании. Немодифицированный образец: отмывали скорлупу в теплой воде ($32\text{--}33\text{ }^{\circ}\text{C}$) от загрязнений, высушивали при температуре $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, измельчали и методом ситового анализа отбирали фракции скорлупы размерами от $0,2$ до $0,4\text{ см}$ (рис. 1). Модифицированный образец (рис. 2) готовили также, как немодифицированный, но далее его подвергали сначала ультразвуковой активации [12, 13] (30 мин) в реакторе при частоте $20\text{--}22\text{ кГц}$ и интенсивности от $1,5$ до 10 Вт/см^2 , затем – термической обработке (3 ч при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рис. 1. Фракции яичной скорлуп



Рис. 2. Модифицированный образец скорлупы

Для исследования яичной скорлупы и ее модифицированных образцов при температурном воздействии были проведены эксперименты с использованием метода синхронного термического анализа как метода, наиболее точного и применяемого для исследования различных веществ, при этом использовался прибор – термоанализатор. Анализируемую пробу порошка яичной скорлупы с фиксацией веса в мг нагревали в заданном температурном режиме с заданной скоростью, фиксировали снижение массы вещества (термогравиметрический анализ – ТГ) и возникающие экзо- и эндоэффекты (дифференциальная сканирующая калориметрия – ДСК). ТГ/ДСК-анализ проводился на кафедре пожарной безопасности ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России» на термическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы «NETZSCH» (ФРГ). Результаты исследования обрабатывались с помощью программного обеспечения NETZSCH Proteus Thermal Analysis, версия 6.1.0 в виде графических зависимостей. Условия исследования: нагрев проб проводился до 600 °С, скорость нагрева составляла 20 °С/мин, продувочный газ печи – воздух с расходом 20 мл/мин, защитный газ весовой части прибора – азот с расходом 20 мл/мин. Масса образцов – 27–56 мг. Материал тиглей – корунд.

Результаты и обсуждение

Анализ образцов порошка из яичной скорлупы и процесс их прокаливания проведен методом синхронного термического анализа с получением кривых: ТГ (интегральная кривая) – изменение массы образца (%) от температуры (°C); ДТГ – первая производная от ТГ-кривой, иллюстрирующая скорость уменьшения массы образца во времени (%/мин). Результаты изучения образца немодифицированной яичной скорлупы представлены на рис. 3. Тепловые явления от повышения температуры при сжигании образцов скорлупы показаны на рис. 4 (синим цветом обозначена кривая тепловых эффектов ДСК, позволяющая оценить экзо- и эндоэффекты (мВт/мг) в зависимости от температуры (°C)).

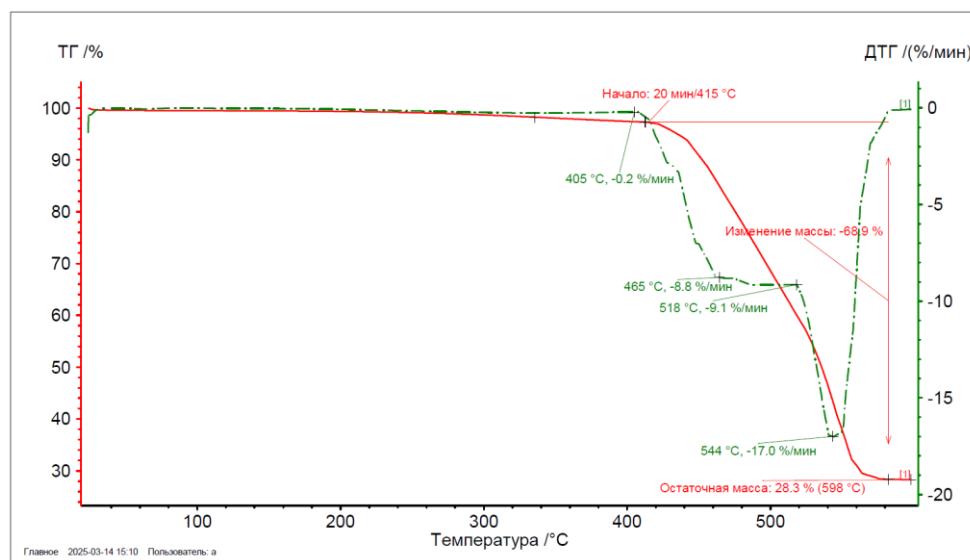


Рис. 3. Кривые ТГ/ДТГ кальцинированной яичной скорлупы

Как видно из рис. 3, начало термической деструкции для исследуемого образца яичной скорлупы фиксируется при достижении 405 °C, затем – до температуры 598 °C происходит убыль массы (на 68,9 %) с максимальной скоростью 17,0 %/мин при температуре 544 °C. Остаточная масса образца – 28,3 %. На графике 3 по кривой ДТГ видно двухступенчатое снижение массы, где две температуры – 405 °C и 518 °C являются критическими при термодеструкции скорлупы.

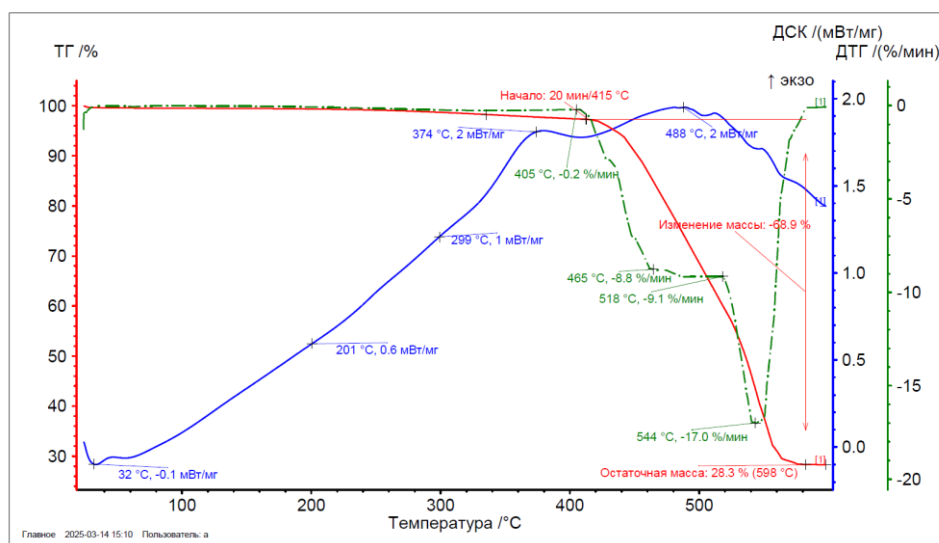


Рис. 4. Кривые ТГ/ДТГ/ДСК кальцинированной яичной скорлупы

Рис. 4 отражает происходящие в пробе тепловые процессы, где при температуре 32 °С наблюдается небольшой эндоэффект (-0,1 мВт/мг), после которого происходят экзо-процессы, сопровождающиеся с нарастающим выделением тепла (от 0,6 до 2 мВт/мг), связанные с выгоранием органической части образца. Наибольшее выделение тепла совпадает с подготовкой к термодеструкции (374 °С) и с переходом ко второй ступени деструкции – по скорости снижения массы (488 °С).

Повышение температуры увеличивает эффективность молекулярного теплового движения, воздействующего на оболочку фракций яичной скорлупы, а также увеличивает площадь контакта, что повышает выход белка из яичной скорлупы.

Результаты свидетельствуют, что при повышении температуры до 405 °С происходят только процессы дегидратации. Поэтому пористая поверхность образуется за счет удаления связанной и свободной воды из пор скорлупы. При повышении температуры от 405 °С до 550 °С начинается постепенное разложение карбоната кальция с образованием оксида кальция и наблюдается уменьшение массы образцов за счет выделения углекислого газа. На этом этапе содержание в образцах CaCO_3 еще значительно ощутимо.

Снижение качества порошка из яичной скорлупы, наблюдаемое через 20 мин при температуре 415 °С, было вызвано, в основном, разложением органических веществ и удалением влаги из яичной скорлупы. Структура порошка яичной скорлупы при температуре 415–544 °С изменяется из-за удаления углекислого газа, однако после 550 °С динамика изменения массы яичной скорлупы практически не меняется, что указывает на то, что при достижении этой температуры CaCO_3 практически разлагается до CaO .

По результатам анализа ТГ/ДТГ можно сделать вывод, что температура, при которой CaO начинает постепенно образовываться, а CaCO_3 начинает разлагаться, составляет 550–600 °С. Из яичной скорлупы за счет образовавшихся при сгорании органической части и образующихся пор можно получить адсорбент CaO , нагревая его при температуре 600 °С и выше.

Остаточная (зольная) масса полученного адсорбента составила 28,3 %, хотя должна быть по реакции 56 %. Это доказывает, что в процессе сушки в исходном образце осталась ещё вода и органическая пленка (28 %).

Таким образом, был установлена температура выхода целевого продукта при прокаливании яичной скорлупы. При температуре ниже 500 °С фаза CaCO_3 в яичной скорлупе полностью не разлагается на CaO . Такой образец продукта следует считать промежуточным, он состоит, в основном, из CaO и CaCO_3 . После карбонизации органических веществ на поверхности такого продукта образуется черный твердый слой, который в конечном итоге улучшит сорбционный эффект в случае использования полученного продукта в качестве адсорбента (рис. 5).

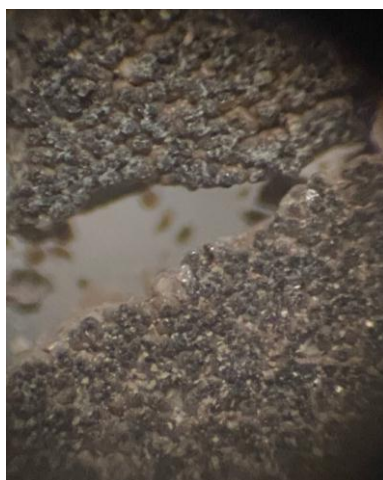


Рис. 5. Карбонизации органических веществ на поверхности адсорбента (увеличение X40)

Однако при повышении температуры обжига наблюдается переходный этап, поскольку более высокие температуры способствуют превращению CaCO_3 в CaO , увеличивая содержание CaO (рис. 6). Поскольку органические соединения легко карбонизируются при высоких температурах, увеличивая концентрацию побочных продуктов, омыление реагентов в сильнощелочной среде приводит к образованию соответствующих солей. На основании этих результатов в качестве оптимального диапазона температур реакции формирования адсорбента был выбран 550–600 °С.



Рис. 6. Переходный этап от CaCO_3 к CaO
(при температуре 518 °С и продолжительности прокаливания 3 ч)

Исследование модифицированных образцов яичной скорлупы методом синхронного термического анализа позволило подтвердить выдвинутую ранее гипотезу о снижении основной массы исследуемых образцов скорлупы в температурном промежутке 200–450 °С из-за разложения органических веществ и удаления влаги, поэтому остаточная масса модифицированного образца скорлупы снизилась всего на 0,7 % и зольность образца составила 99,3 % (рис. 7).

Рис. 7 показывает, что нагрев модифицированного образца яичной скорлупы до 600 °С не меняет массу образца, скорость убыли массы – 0 %/мин; количество выделяющегося тепла достигает величину 1 мВт/мг при 500 °С. При более низких температурах выделение тепла мало – от 0,2 до 0,7 мВт/мг в интервале 200–400 °С. До температуры 100 °С наблюдается небольшой эндоэффект (– 0,07 – – 0,03 мВт/мг), связанный с испарением влаги.

Обработка водных растворов модифицированных образцов ультразвуком увеличивала растворимость соединений кальция за счет кавитационных эффектов. Число кавитации определялось кавитометром и составляло 700–800. Содержание ионов кальция, оксидов кальция и карбоната кальция определяли титриметрическим методом анализа, результаты представлены в табл. 1. Кроме того, под воздействием энергии ультразвука в молекулах и структуре белков происходят изменения, облегчающие извлечение липидов и белков из фракций яичной скорлупы.

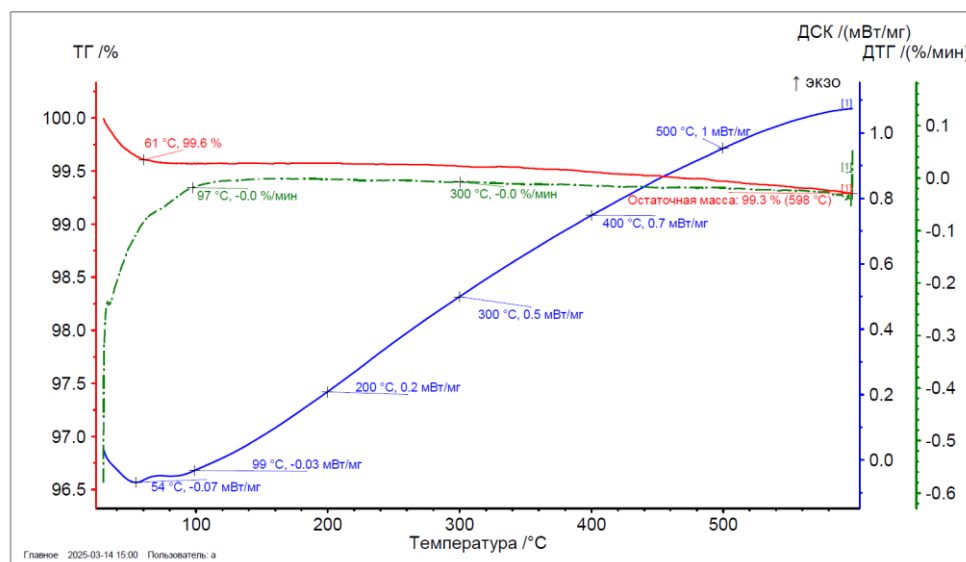


Рис. 7. Термогравиметрические кривые модифицированных образцов яичной скорлупы

С применением ультразвука (20 кГц, интенсивностью от 1,5 до 10 Вт/см²) меняется также и фазовое состояние кальцита. Было обнаружено, что при низкой интенсивности ультразвука преимущественно образуется ватерит, как обоснование модификации.

Таблица 1

Содержание растворимых форм соединений кальция после прокаливании и ультразвуковой обработки

Температура прокаливании, T, °C	Содержание Ca ²⁺ , мг/дм ³	Содержание СаО, мг/дм ³	Содержание СаСО ₃ (немодиф.), %
400	30,06	42,08	7,52
450	50,1	70,14	12,53
500	80,16	112,22	20,04
550	110,22	154,31	27,56

Рентгенограмма прокаленной яичной скорлупы при 600 °C в течение 4 ч неоднозначно показывает монофазный СаО. Ширина запрещенной зоны порошка яичной скорлупы составляет 4,06 эВ, что меньше, чем у товарного (коммерческого) СаСО₃ (4,32 эВ) [14]. Результаты показали, что энергия активации разложения, рассчитанная с помощью различных методов, хорошо согласуется с полученным ранее значением, то есть находится в диапазоне 207–214 кДж*моль⁻¹. Основываясь на спектроскопии комбинационного рассеяния света, яичная скорлупа демонстрирует лучшую кристалличность по сравнению с обычным, товарным СаСО₃.

Таким образом, кинетика и механизмы химических реакций, участвующих в разложении яичной скорлупы, изучались с помощью экспериментальных методов и теоретических моделей.

Заключение

Проведенные исследования показали, что обжиг яичной скорлупы при температуре 550–600 °C позволяют получить ценные вещества, а именно – СаО и СаСО₃, что значительно снижает энергозатраты по сравнению с процессами переработки яичной скорлупы, описанными в других исследованиях (1 000 °C [14]). Способ их получения прост, продолжительность реакции относительно невелика, а выход продукта высок. Присутствие фазы кальцита в сырой яичной скорлупе и постепенное при обжиге образование из него оксида кальция подтверждено

экспериментально. Яичная скорлупа, прокаленная при высоких температурах, и просто яичная скорлупа могут стать эффективно устойчивыми и подходящими источниками CaO и CaCO_3 для пищевых добавок и фармацевтических препаратов, биоматериалов, фотолюминесценции и фотокатализатора для разложения органических красителей. Рециклированную яичную скорлупу следует признать альтернативным источником CaO и CaCO_3 для производства различных материалов с добавленной стоимостью. CaCO_3 и CaO , полученные из скорлупы, применимы при изготовлении клеев, герметиков, красок, бумаги, цемента и строительных материалов [11, 15]. Использование яичной скорлупы в качестве сырьевого материала предпочтительнее применения природных силикатных минералов, так как позволяет снизить энергопотребление, стоимость добычи и переработки, а также минимизирует воздействие на природную среду за счёт рециклинга неизбежного отхода пищевой промышленности. Кроме того, поскольку известняк является невозобновляемым природным ресурсом, использование возобновляемых отходов яичной скорлупы в качестве альтернативного источника карбоната кальция может снизить негативное воздействие на природные запасы известняка.

Список источников

1. Zhou Yu.H., Mei-Hu M.A., Cai Z.X. The extraction and separation technology of keratin and collagen and research of the functional polypeptide in eggshell membrane // *Sichuan Food Ferment.* 2008. № 44. P. 48–54.
2. Li F.Z. Study on separation technology of eggshell membrane // *Farm Prod Process.* 2020. № 4. DOI: 10.3390/proceedings2019029122.
3. Hincke M.T., Nys Yu., Gautron J. The role of matrix proteins in eggshell formation // *J Poultry Sci.* 2010. Vol. 47. № 3. P. 208–219. DOI: 10.2141/jpsa.009122.
4. Advances in eggshell membrane separation and solubilization technologies / Ch. Han [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science.* 2023. Vol. 10. P. 1116126. DOI: 10.3389/fvets.2023.1116126.
5. Leach Jr R.M. Biochemistry of the organic matrix of the eggshell // *Poultry Science.* 1982. Vol. 61. № 10. P. 2040–2047. DOI: 10.3382/ps.0612040.
6. Processed eggshell membrane powder: bioinspiration for an innovative wound healing product / T.A.E. Ahmed [et al.] // *Mater Sci Eng.* 2019. № 95. P. 192–203. DOI: 10.1016/j.msec.2018.10.054.
7. Chi Yu., Liu R.A. Method of Separating Poultry Eggshell Membranes: China Patent NO 202011494359.0. Beijing: China National Intellectual Property Administration. 2020.
8. Waste eggshell membrane-templated CuO-ZnO nanocomposites with enhanced adsorption, catalysis and antibacterial properties for water purification / X. He [et al.] // *Chem Eng J.* 2019. Vol. 369. P. 621–633. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.047.
9. Hasebe Yu. Manufacturing Method of Batch Eggshell Membranes and Manufacturing Method of Egg-Related Product Groups: JP Patent NO 2019004412. Tokyo, TKY: Japanese Patent Office. 2020.
10. Tsuge K., Sensei Yu. Eggshell Membrane Protein Lysate, Method for Producing the Same, Composition Containing the Solubilized Egg Shell Membrane Protein, Composition for Hair Cosmetic Composition and Hair Treatment Method Using the Composition for Hair Cosmetic Composition: JP Patent NO 2016150572. Tokyo: Japanese Patent Office. 2020.
11. Осаждение карбоната кальция для хранения и использования CO_2 : обзор кристаллизации и полиморфизма карбоната / Р. Чанг [и др.] // *Front. Energy Res.* 2017. Vol. 5. P. 17. DOI: 10.3389/fenrg.2017.00017.
12. Jain S., Anal A.K. Optimization of extraction of functional protein hydrolysates from chicken egg shell membrane (ESM) by ultrasonic assisted extraction (UAE) and enzymatic hydrolysis // *Lwt Food Sci Technol.* 2016. Vol. 69. P. 295–302. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.057.
13. The effect of ultrasound on the alkali extraction of proteins from eggshell membranes / I. Marcet [et al.] // *J Sci Food Agric.* 2018. Vol. 98. P. 1765–1772. DOI: 10.1002/jsfa.8651.

14. Kaur N., Singh K. Decompositional and chemical reaction kinetics study of eggshell powder waste for value-added materials // *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*. 2023. T. 148. № 13.

15. Глицеролат кальция в качестве катализатора для синтеза циклопентадеканолида из отходов яичной скорлупы / Х. Ченг [и др.] // *Front. Chem.* 2021. Vol. 9. P. 770247. DOI: 10.3389/fchem.2021.770247.

References

1. Zhou Yu.H., Mei-Hu M.A., Cai Z.X. The extraction and separation technology of keratin and collagen and research of the functional polypeptide in eggshell membrane // *Sichuan Food Ferment.* 2008. № 44. P. 48–54.

2. Li F.Z. Study on separation technology of eggshell membrane // *Farm Prod Process*. 2020. № 4. DOI: 10.3390/proceedings2019029122.

3. Hincke M.T., Nys Yu., Gautron J. The role of matrix proteins in eggshell formation // *J Poultry Sci.* 2010. Vol. 47. № 3. P. 208–219. DOI: 10.2141/jpsa.009122.

4. Advances in eggshell membrane separation and solubilization technologies / Ch. Han [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science*. 2023. Vol. 10. P. 1116126. DOI: 10.3389/fvets.2023.1116126.

5. Leach Jr R.M. Biochemistry of the organic matrix of the eggshell // *Poultry Science*. 1982. Vol. 61. № 10. P. 2040–2047. DOI: 10.3382/ps.0612040.

6. Processed eggshell membrane powder: bioinspiration for an innovative wound healing product / T.A.E. Ahmed [et al.] // *Mater Sci Eng.* 2019. № 95. P. 192–203. DOI: 10.1016/j.msec.2018.10.054.

7. Chi Yu., Liu R.A. Method of Separating Poultry Eggshell Membranes: China Patent NO 202011494359.0. Beijing: China National Intellectual Property Administration. 2020.

8. Waste eggshell membrane-templated CuO-ZnO nanocomposites with enhanced adsorption, catalysis and antibacterial properties for water purification / X. He [et al.] // *Chem Eng J.* 2019. Vol. 369. P. 621–633. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.047.

9. Hasebe Yu. Manufacturing Method of Batch Eggshell Membranes and Manufacturing Method of Egg-Related Product Groups: JP Patent NO 2019004412. Tokyo, TKY: Japanese Patent Office. 2020.

10. Tsuge K., Sensei Yu. Eggshell Membrane Protein Lysate, Method for Producing the Same, Composition Containing the Solubilized Egg Shell Membrane Protein, Composition for Hair Cosmetic Composition and Hair Treatment Method Using the Composition for Hair Cosmetic Composition: JP Patent NO 2016150572. Tokyo: Japanese Patent Office. 2020.

11. Osazhdenie karbonata kal'ciya dlya hraneniya i ispol'zovaniya CO₂: obzor kristallizacii i polimorfizma karbonata / R. Chang [i dr.] // *Front. Energy Res.* 2017. Vol. 5. P. 17. DOI: 10.3389/fenrg.2017.00017.

12. Jain S., Anal A.K. Optimization of extraction of functional protein hydrolysates from chicken egg shell membrane (ESM) by ultrasonic assisted extraction (UAE) and enzymatic hydrolysis // *Lwt Food Sci Technol.* 2016. Vol. 69. P. 295–302. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.057.

13. The effect of ultrasound on the alkali extraction of proteins from eggshell membranes / I. Marcet [et al.] // *J Sci Food Agric.* 2018. Vol. 98. P. 1765–72. DOI: 10.1002/jsfa.8651.

14. Kaur N., Singh K. Decompositional and chemical reaction kinetics study of eggshell powder waste for value-added materials // *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*. 2023. T. 148. № 13.

15. Глицеролат калия в качестве катализатора для синтеза циклопентадеканолида из отходов яичной скорлупы / H. Cheng [i dr.] // *Front. Chem.* 2021. Vol. 9. P. 770247. DOI: 10.3389/fchem.2021.770247.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.09.2025; одобрена после рецензирования: 15.10.2025;
принята к публикации: 16.10.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.09.2025; approved after review: 15.10.2025;
accepted for publication: 16.10.2025

Информация об авторах:

Будыкина Татьяна Алексеевна, профессор кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), доктор технических наук, e-mail: agz@amchs.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9571-3166>, SPIN-код: 5164-7470

Соколов Леонид Иванович, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Москва, Локомотивный проезд, д. 21); профессор кафедры «Строительство систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23), доктор технических наук, профессор, e-mail: sokolovli@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9635-8389>, SPIN-код: 3010-5480

Смирнова Ирина Михайловна, аспирант Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (РГГУ-МГРИ) (117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23), e-mail: mishinaira95@gmail.com

Information about the authors:

Budykina Tatiana A., professor of the department of fire safety of Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), doctor of technical sciences, e-mail: agz@amchs.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9571-3166>, SPIN: 5164-7470

Sokolov Leonid I., chief researcher at the scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences (127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21); professor of the department «Construction of water supply and sanitation systems and structures» of the Russian state geological exploration university named after Sergo Ordzhonikidze (117997, Moscow, GSP-7, Miklukho Maklaya str., 23), doctor of technical sciences, professor, e-mail: sokolovli@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9635-8389>, SPIN: 3010-5480

Smirnova Irina M., postgraduate student at the Russian state geological exploration university named after Sergo Ordzhonikidze (RGGU-MGRI) (23 Miklukho-Maklaya str., GSP-7, Moscow, 117997), e-mail: mishinaira95@gmail.com