

Научная статья

УДК 66.061.16:66.099.2:66.011

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-283-290>

EDN: DPSETE



Нанесение защитного покрытия на частицы перкарбоната натрия в аппарате с псевдоожиженным слоем

А.А. Липин✉, А.Г. Липин

Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация. Перкарбонат натрия (ПКН) применяется в качестве экологически чистого отбеливателя в составе синтетических моющих средств. Он является сильным окислителем и несовместим с некоторыми другими компонентами моющего средства, например, ферментами. Решением проблемы может стать применение капсулированного ПКН. Замедленное его высвобождение позволит ферментам работать с максимальной эффективностью до деактивации в присутствии ПКН. Актуальной является задача выбора материала оболочки и необходимой толщины слоя покрытия. В данной работе капсулирование гранул ПКН осуществлялось методом распыления раствора силиката натрия посредством пневматической форсунки на псевдоожиженный слой гранул. Были получены образцы капсулированного ПКН с содержанием покрытия 5, 8, 10, 13% от массы исходного продукта. Исследована кинетика растворения полученных капсул в статических и динамических условиях. При относительной массе оболочки 5% время растворения в динамических условиях составляет 10 мин, при 8% – 14 мин, 10% – 19 мин, 13% – 30 мин. Для прогнозирования профиля выделения активного компонента из капсулированной гранулы ПКН в условиях, отличающихся от проведенных экспериментов, была составлена математическая модель этого процесса. Для параметрической идентификации математической модели путем решения обратной задачи было определено значение эффективного коэффициента диффузии ПКН через капсулу, которое составило $1 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения ПКН из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие.

Ключевые слова: капсулирование, перкарбонат натрия, псевдоожиженный слой, силикат натрия, кинетика растворения

Благодарности. В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования Ивановского государственного химико-технологического университета (г. Иваново).

Для цитирования: Липин А.А., Липин А.Г. Нанесение защитного покрытия на частицы перкарбоната натрия в аппарате с псевдоожиженным слоем // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 2. С. 283–290. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-283-290>. EDN: DPSETE.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Application of a protective coating on sodium percarbonate particles in a fluidized bed apparatus

Andrey A. Lipin✉, Aleksandr G. Lipin

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

Abstract. Sodium percarbonate (SPC) is used as an environmentally friendly bleaching agent in synthetic detergents. This strong oxidizing agent is incompatible with some other detergent components, such as enzymes. This problem can be solved by encapsulating SPC, whose delayed release will allow the enzymes to function with maximum efficiency before deactivation in the presence of SPC. Therefore, the selection of a coating material and the coating layer thickness seems to be a relevant research direction. In this work, SPC granules were encapsulated by spraying a sodium silicate solution through a pneumatic nozzle over a fluidized layer of granules. Encapsulated SPC samples with the coating content of 5, 8, 10 and 13% of the mass of the initial product were obtained. The dissolution kinetics of the obtained capsules under static and dynamic conditions was studied. At the relative coating mass of 5, 8, 10 and 13%, the dissolution time under dynamic conditions comprised 10, 14, 19 and 30 min, respectively. In order to predict the release of the active component from encapsulated SPC under the conditions different from those used in the conducted experiments, a mathematical model of this process was obtained. For parametric identification of the mathematical model by solving an inverse problem, the value of the effective diffusion coefficient of SPC through the capsule was found to be $1 \cdot 10^{-10}$ m²/s. The calculated and experimental values of SPC release from the encapsulated granules showed good agreement.

Keywords: encapsulation, sodium percarbonate, fluidized bed, sodium silicate, dissolution kinetics

© Липин А.А., Липин А.Г., 2023

Acknowledgements. The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use, Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

For citation: Lipin A.A., Lipin A.G. Application of a protective coating on sodium percarbonate particles in a fluidized bed apparatus. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):283-290. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-283-290>. EDN: DPSETE.

ВВЕДЕНИЕ

Перкарбонат натрия (ПKN) представляет собой аддукт карбоната натрия и перекиси водорода (пергидрат) с формулой $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$. Это бесцветное, кристаллическое, гигроскопичное и растворимое в воде твердое вещество [1–3].

Основными областями применения ПKN являются производство бытовых кислородосодержащих нехлорных отбеливателей; производство порошковых моющих средств, где он используется как отбеливающий компонент; производство чистящих средств с антибактериальным и дезинфицирующим эффектом; текстильная промышленность (отбеливание, аппретирование и расшлихтовка тканей и др.); косметическая и фармацевтическая промышленность (изготовление зубных паст, дезодорирующих составов, лосьонов, шампуней, мазей); химическая промышленность (в качестве универсального окислителя); металлургическая промышленность (нейтрализация, окисление, очистка сточных вод и извлечение металлов); очистка твердых поверхностей пищевого, медицинского и прочего оборудования [4–10].

В качестве активного отбеливающего компонента ПKN входит в состав ряда чистящих средств, включая нехлорные отбеливатели, стиральные порошки и средства для мытья посуды. Обычно такие моющие составы содержат среди прочих компонентов ферменты, активаторы отбеливания и отдушки. Отбеливающее действие ПKN обусловлено высвобождением активного кислорода при его разложении во время стирки [4, 5].

Однако взаимодействие между ПKN и другими компонентами состава приводит к постепенному преждевременному разложению перкарбоната и, следовательно, к потере отбеливающей способности при хранении и транспортировке состава. Это прогрессирующее разложение ускоряется, когда перкарбонат подвергается нагреванию или хранится в присутствии влаги. Кроме того, ПKN является сильным окислителем, а также он несовместим с некоторыми компонентами моющего состава в растворе, например, с ферментами и отдушками. Так, ферменты могут быть дезактивированы перекисью водорода в водном растворе.

Решением этой проблемы является обеспечение замедленного растворения перкарбоната натрия, входящего в состав моющего состава [11]. Это позволило бы ферментам работать с максимальной эффективностью перед их дезактивацией в присутствии перекиси водорода.

Для контролируемого высвобождения активных ингредиентов широко используются технологии капсулирования. Капсулирование применяется в пищевой, фармацевтической, химической отраслях промышленности, при получении удобрений пролонгированного действия [12–15]. При заключении активного ингредиента в оболочку его можно защитить от воздействий окружающей среды. Путем выбора

соответствующего материала оболочки с определенной структурой могут быть достигнуты желаемые профили высвобождения. Нанесение оболочек осуществляется в аппаратах с псевдоожиженным слоем, фонтанирующим слоем, в барабанных или тарельчатых грануляторах [16–19].

Для улучшения стабильности ПKN при хранении во влажной атмосфере в качестве материала защитной оболочки предложено использовать полиэтиленгликоль, ксантановую камедь, поливинилцетат, сульфат натрия, сульфат магния [20]. Однако они не обеспечили замедленного высвобождения отбеливателя на основе перекиси. В данном исследовании применяли силикат натрия. Силикат натрия также является важным компонентом моющего средства: он смягчает воду, образуя осадок, который можно легко смыть. Кроме того, все силикаты обладают превосходным буферным действием против кислых соединений.

Цель этого исследования – установить зависимость между толщиной оболочки и временем высвобождения ПKN в водной среде в процессе стирки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах использовался ПKN с размером частиц 500–900 мкм. Раствор силиката натрия готовили путем разбавления 50 масс. % раствора таким же объемом деионизированной воды.

Процесс нанесения покрытия осуществлялся в лабораторном аппарате с псевдоожиженным слоем с нижним расположением распыливающего устройства (рис. 1).

Гранулы ПKN загружаются в аппарат 1 через верхнюю крышку. Воздух нагнетается компрессором 7 под решетку и на форсунку. Подача воздуха на форсунку и под решетку регулируется вентилями 6 и измеряется ротаметрами 5. Поток воздуха попадает под решетку для фонтанирования ПKN, предварительно нагреваясь в калорифере 4. Температура в грануляторе поддерживается и регистрируется с помощью измерителя-регулятора 10. Измерение температуры в слое осуществляется с помощью термомпары 11, а температуры воздуха под решеткой – с помощью термомпары 12. Раствор капсулянта из емкости 9 нагнетается перистальтическим насосом 8 в форсунку 3, посредством которой распыляется в фонтанирующий слой гранул. В процессе капсулирования в фонтанирующем слое возможно образование мелкой фракции, пыли. Для очистки отходящего воздуха от пыли предусмотрен рукавный фильтр 2.

В аппарат загружалось 50 г ПKN. Раствор диспергировался пневматической форсункой на мелкие капли. Капли, сталкиваясь с частицами, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку. Растворитель испаряется, остается затвердевший слой покрывающего материала, окружающий частицы.

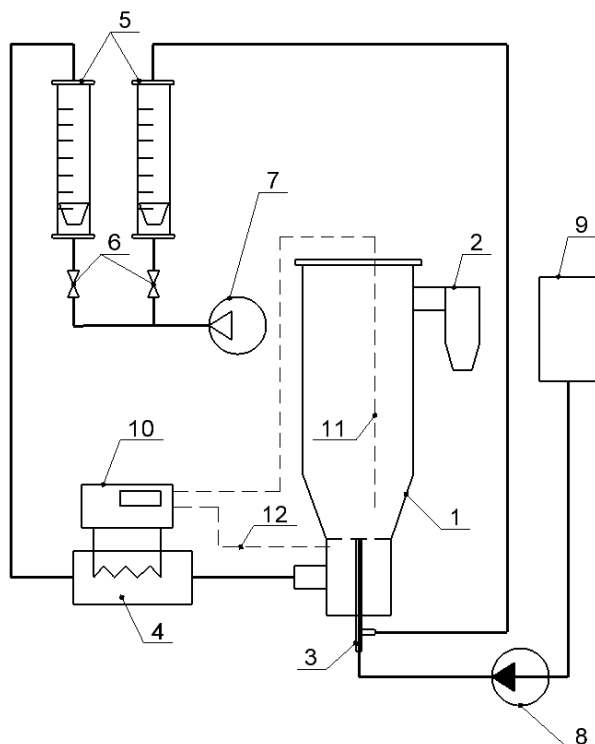


Рис. 1. Установка для капсулирования в кипящем слое частиц: 1 – гранулятор; 2 – рукавный фильтр; 3 – форсунка; 4 – калорифер; 5 – ротаметр; 6 – вентиль; 7 – компрессор; 8 – насос перистальтический; 9 – емкость капсулянта; 10 – измеритель-регулятор температуры; 11, 12 – датчик температуры

Fig. 1. Scheme of the experimental plant: 1 – fluidized bed coater; 2 – bag filter; 3 – nozzle; 4 – heater; 5 – rotameter; 6 – regulating valve; 7 – compressor; 8 – peristaltic pump; 9 – tank with coating agent; 10 – temperature controller; 11, 12 – temperature sensor

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были получены образцы капсулированного ПКН с содержанием покрытия 5, 8, 10, 13% от массы исходного продукта.

На рис. 2 приведена фотография среза гранулы, полученная на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA3 (Tescan, Чехия) с увеличением 2720x. Хорошо видна структура ядра ПКН. Содержание покрытия из силиката натрия – 13%. В слое покрытия нет дефектов, толщина покрытия достаточно равномерная. Среднее значение толщины слоя покрытия составляет 0,010 мм.

На рис. 3 представлены фотографии частиц, растворяющихся в дистиллированной воде в статических условиях.

На изображениях рис. 3 видно, что непокрытая частица ПКН немедленно растворилась в воде и высвободила пузырьки кислорода, окружающие частицу. У частиц ПКН с долей покрытия 5% в течение первой минуты на поверхности частиц не наблюдалось пузырьков, что указывает на замедленную скорость растворения ядра капсулы, защищенного оболочкой из силиката натрия. Однако после первой минуты наблюдалось значительное растворение частицы ПКН, покрытой силикатом натрия, что привело к появле-

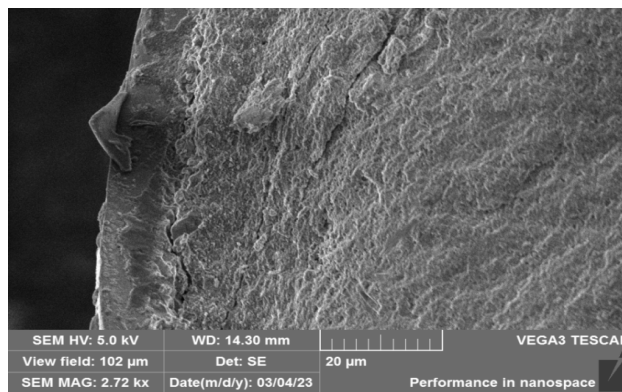


Рис. 2. SEM-изображение среза капсулированной гранулы перкарбоната натрия

Fig. 2. SEM image of coated SPC granule

нию пузырьков на ее поверхности. У капсулированных частиц с долей покрытия 10% в течение первых 5 мин растворение практически не наблюдалось. В дальнейшем в течение 10 мин наблюдалось лишь несколько мелких пузырьков, что указывает на проникновение воды через оболочку и растворение ядра частиц, состоящего из ПКН. Такая задержка высвобождения активного компонента может позволить ферментам, содержащимся в моющем средстве, полностью функционировать до того, как они вступят в контакт с ПКН в процессе стирки.

Для наблюдения за выделением ПКН из капсулированных частиц в динамических условиях применялся метод кондуктометрии. Кинетика растворения капсулированного ПКН исследовалась по следующей методике. Навеску массой 0,5 г растворяли в 49,5 г дистиллированной воды. Растворение вели при перемешивании. Каждую минуту измеряли электропроводность раствора с помощью кондуктометра «Анион 4100» (ООО НП «Инфраспек-Аналит», Россия) и по калибровочному графику определяли концентрацию раствора. Затем рассчитывали степень выделения ПКН по формуле:

$$R = \frac{C}{C_{\max}}, \quad (1)$$

где C , C_{\max} – текущая и максимальная концентрация раствора соответственно. Под максимальной концентрацией понимается концентрация раствора при полном выделении целевого компонента из гранулы.

На рис. 4 представлены кривые, характеризующие зависимости степени выделения ПКН из капсулированных гранул от времени в динамических условиях при разной относительной массе оболочки.

Из кривых рис. 4 следует, что при изменении относительной массы покрытия из силиката натрия можно регулировать скорость высвобождения активного компонента. Задержка высвобождения ПКН позволит ферментам работать с максимальной эффективностью перед их дезактивацией в присутствии перекиси водорода. Установлена зависимость времени выделения ПКН из капсулированных гранул от толщины нанесенной оболочки. При относительной массе оболочки 5% время растворения составляет 10 мин, при 8% – 14 мин, 10% – 19 мин, 13% – 30 мин.

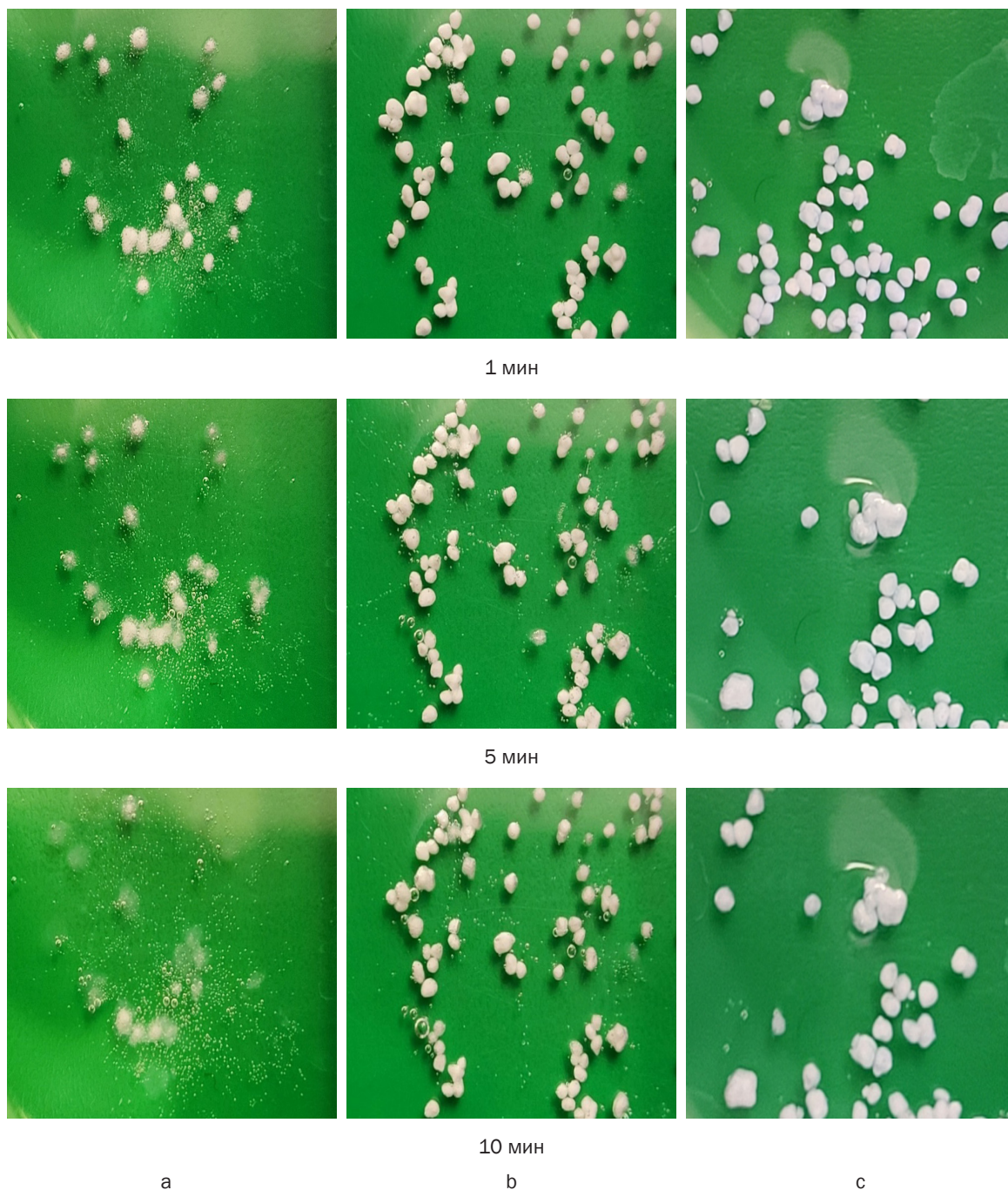


Рис. 3. Фотографии растворяющихся частиц: а – непокрытого перкарбоната натрия; б – капсулированного перкарбоната натрия с долей покрытия 5%; с – капсулированного перкарбоната натрия с долей покрытия 10% в статических условиях

Fig. 3. Images of dissolving particles under static condition: а – uncoated SPC; б – coated SPC with a coverage fraction of 5%; с – coated SPC with a coverage fraction of 10%

Математическое моделирование. Для прогнозирования профиля выделения активного компонента из капсулированной гранулы ПКН в условиях, отличающихся от проведенных экспериментов, была составлена математическая модель. Рассматривался процесс выделения целевого компонента из гранулы радиусом R , покрытой защитной оболочкой толщиной δ_n (рис. 5).

Перенос целевого компонента через слой силикатного покрытия в раствор описывается дифференциальным уравнением диффузии (1) с граничным

условием первого рода на внутренней поверхности покрытия и граничным условием третьего рода на наружной поверхности. Из-за малой толщины слоя покрытия по сравнению с размерами ядра ($\delta_n \ll R_n$) он рассматривается как плоская пластина.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}, \quad R_n < r < R_k \quad (2)$$

Граничное условие для уравнения (2) на внутренней поверхности покрытия записывается в предпо-

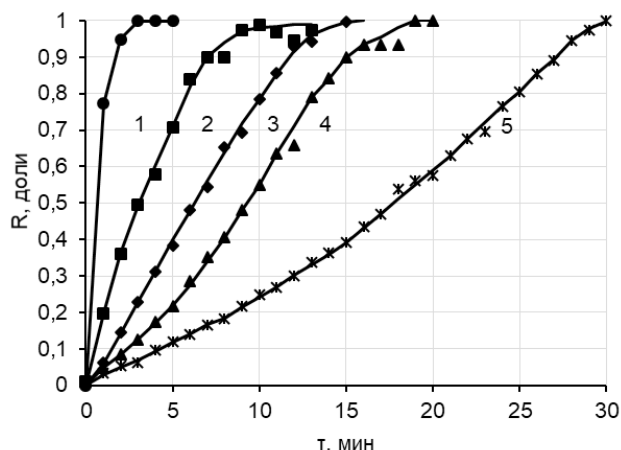


Рис. 4. Зависимость степени выделения перкарбоната натрия от времени при разной относительной массе оболочки, %: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 13

Fig. 4. SPC release degree versus time. Mass fraction of the coating, %: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 13

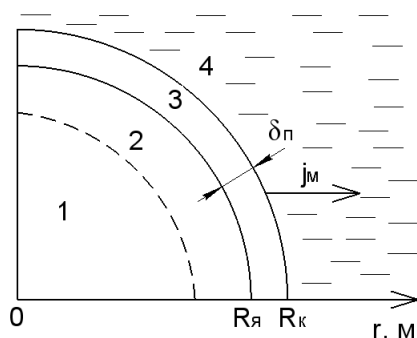


Рис. 5. Расчетная схема: 1 – твердое ядро; 2 – насыщенный раствор; 3 – слой покрытия; 4 – окружающая жидкость

Fig. 5. Calculation scheme: 1 – solid core; 2 – saturated solution; 3 – coating layer; 4 – surrounding liquid

ложении, что на внутренней поверхности покрытия устанавливается равновесное значение концентрации ПКН:

$$C(R_{я}, \tau) = \varepsilon \cdot C_{нас} \quad \text{при } C_{гр} \geq C_{нас}, \quad (3)$$

$$C(R_{я}, \tau) = \varepsilon \cdot C_{гр} \quad \text{при } C_{гр} < C_{нас}. \quad (4)$$

Предположение основано на том, что перенос компонентов в растворе осуществляется значительно быстрее, чем в слое покрытия. Суммарный процесс переноса лимитирован переносом в слое покрытия. Соотношение (3) имеет место при наличии твердого ядра в период растворения, а соотношение (4) – после растворения твердого ядра. Коэффициент распределения ε характеризует долю пустот в слое покрытия, заполненных жидкостью (раствором ПКН).

На наружной поверхности покрытия предполагается массообмен по закону массоотдачи:

$$-D_m \frac{\partial C(R_k, \tau)}{\partial r} = \beta \left[\frac{C(R_k, \tau)}{\varepsilon} - C_{ж} \right] = j_m, \quad (5)$$

где j_m – плотность массового потока ПКН через поверхность раздела твердой и жидкой фаз, т.е. потока

ПКН в окружающую гранулу жидкость, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$; $C_{ж}$ – концентрация ПКН в окружающей гранулу жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; D_m – эффективный коэффициент диффузии ПКН через слой покрытия, $\text{м}^2/\text{с}$.

Само силикатное покрытие тоже является водорастворимым, его толщина уменьшается. Предполагалась нелинейная зависимость толщины покрытия от времени процесса:

$$\delta_n = \delta_{n0} / (1 + k \cdot \tau). \quad (6)$$

Концентрация ПКН в окружающей жидкости находится из уравнения:

$$V_{ж} \frac{dC_{ж}}{d\tau} = 4\pi R_k^2 N_{гр} j_k, \quad (7)$$

где $V_{ж}$ – объем окружающей жидкости; $N_{гр}$ – число гранул; при $t = 0$, $C_{ж} = 0$.

Для определения границ разных периодов процесса выделения ПКН используется условная величина концентрации ПКН внутри капсулы $C_{гр}$:

$$\frac{dC_{гр}}{d\tau} = -\frac{4\pi R_k^2 j_k}{V_{я}}, \quad (8)$$

где $V_{я} = \frac{4}{3}\pi R_{я}^3$ – объем ядра; при $t = 0$, $C_{гр} = \rho_{гв}$; по физическому смыслу $C_{гр}$ – отношение массы ПКН внутри капсулы к начальному объему ядра.

Таким образом, система уравнений (2–8) представляет собой математическую модель процесса выделения ПКН из капсулированной гранулы в водной среде. Для решения системы уравнений математического описания использовался метод конечных разностей. Программная реализация модели выполнена в математическом пакете Mathcad.

Параметрическая идентификация и проверка адекватности математической модели. На первом этапе моделирования процесса выделения мочевины из капсулированных гранул проводилась параметрическая идентификация математической модели. Путем решения обратной задачи определялось значение эффективного коэффициента диффузии ПКН через капсулу, обеспечивающее хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На втором этапе проводилось прогнозирование хода процесса при другой относительной массовой доле покрытия.

Для ряда значений эффективного коэффициента диффузии ПКН через капсулу D_m реализовывалось решение системы уравнений (2–8) математического описания. Далее для каждого варианта рассчитывалось среднеквадратичное отклонение расчетных R_i значений степени выделения от опытных $R_{эi}$:

$$f(D_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{э}} (R_i - R_{эi})^2}{N_{э}}}. \quad (9)$$

Значение D_m , доставляющее минимум функции $f(D_m)$, использовалось далее для прогнозных расчетов. Для процедуры параметрической идентификации модели применялись экспериментальные

данные по кинетике выделения ПКН из капсулированных гранул с относительной массовой долей покрытия 10% (см. рис. 4). Величина эффективного коэффициента диффузии ПКН составила $1 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Значение эмпирического коэффициента в формуле (6) $k=0,00139$.

На рис. 6 приведены зависимости степени выделения ПКН от времени процесса для гранул с относительной массовой долей покрытия 5, 8 и 13%.

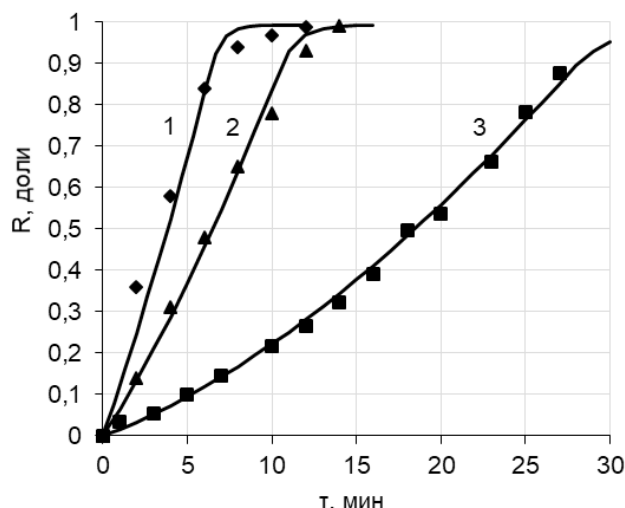


Рис. 6. Изменение степени выделения перкарбоната натрия из капсулированных гранул во времени. Относительная массовая доля покрытия, %: 1 – 5; 2 – 8; 3 – 13

Fig. 6. Change in the degree of SPC release from coated granules over time. Mass fraction of the coating, %: 1 – 5; 2 – 8; 3 – 13

Непрерывные линии – прогноз по математической модели, точки соответствуют экспериментальным данным. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения ПКН из капсулированных гранул показывает их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка составила 0,055; 0,03; 0,031 для гранул с относительной массовой долей покрытия 5, 8 и 13% соответственно.

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана возможность получения гранул ПКН с защитным покрытием из силиката натрия в аппарате с псевдоожиженным слоем. Исследования кинетики растворения капсулированных гранул ПКН в статических и динамических условиях показали, что при изменении относительной массовой доли покрытия можно регулировать профиль высвобождения целевого вещества. Задержка высвобождения активного компонента может позволить ферментам, содержащимся в моющем средстве, полностью функционировать до того, как они вступят в контакт с ним в процессе стирки.

Разработана математическая модель процесса высвобождения ПКН из гранул с силикатным покрытием. Модель отражает влияние размера гранул и толщины слоя покрытия на кинетику процесса выделения ПКН. Предложенная модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков высвобождения ПКН из капсулированных гранул. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Для этого были проведены опыты по капсулированию гранул ПКН в силикатные оболочки различной толщины. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения ПКН из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка не превышала 0,055.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Steber J. The ecotoxicity of cleaning product ingredients. In: Handbook for cleaning/decontamination of surfaces. Elsevier Science, 2007. P. 721–746. <https://doi.org/10.1016/B978-044451664-0/50022-X>.
2. Ruiz E.J., Ortega-Borges R., Jurado J.L., Chapman T.W., Meas Y. Simultaneous anodic and cathodic production of sodium percarbonate in aqueous solution // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2008. Vol. 12, no. 1. <https://doi.org/10.1149/1.3005555>.
3. Wada T., Nakano M., Koga N. Multistep kinetic behavior of the thermal decomposition of granular sodium percarbonate: hindrance effect of the outer surface layer // *Journal of Physical Chemistry A*. 2015. Vol. 119, no. 38. P. 9749–9760. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.5b07042>.
4. Bracken J., Tietz D. Analysis of OxiClean: an interesting comparison of percarbonate stain removers // *Journal of Chemical Education*. 2005. Vol. 82, no. 5. P. 762–764. <https://doi.org/10.1021/ed082p762>.
5. Tredwin C.J., Naik S., Lewis N.J., Scully C. Hydrogen peroxide tooth-whitening (bleaching) products: review of adverse effects and safety issues // *British Dental Journal*. 2006. Vol. 200. P. 371–376. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4813423>.
6. Bjørsvik H.R., Merinero J.A.V., Liguori L. Nitroarene catalyzed oxidation with sodium percarbonate or sodium perborate as the terminal oxidant // *Tetrahedron Letters*. 2004. Vol. 45, no. 47. P. 8615–8620. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.09.156>.
7. Li B., Han Z., Ma J., Qiu W., Li W., Zhang B., et al. Novel sodium percarbonate-MnO₂ effervescent tablets for efficient and moderate membrane cleaning // *Water Research*. 2022. Vol. 220. P. 118716. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118716>.
8. Koukabi N. Sodium percarbonate: a versatile oxidizing reagent // *Synlett*. 2010. Vol. 19. P. 2969–2970. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1258997>.
9. Xu H., Pang Y., Li Y., Zhang Sh., Pei H. Using sodium percarbonate to suppress vertically distributed filamentous cyanobacteria while maintaining the stability of microeukaryotic communities in drinking water reservoirs // *Water Research*. 2021. Vol. 197. P. 117111. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117111>.
10. Wada T., Koga N. Kinetics and mechanism of the thermal decomposition of sodium percarbonate: Role of the surface product layer // *Journal of Physical Chemistry A*. 2013. Vol. 117, no. 9. P. 1880–1889. <https://doi.org/10.1021/jp3123924>.

11. Medvedev A.G., Melnik E.A., Shabalova I.V., Mikhailov A.A., Khitrov N.V., Tripolskaya T.A., et al. Development of combined granulation and encapsulation process in production of sodium percarbonate // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. Vol. 51, no. 4. P. 515–522. <https://doi.org/10.1134/S004057951704011X>.

12. Vemmer M., Patel A.V. Review of encapsulation methods suitable for microbial biological control agents // *Biological Control*. 2013. Vol. 67, no. 3. P. 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.09.003>.

13. Мухина М.Т., Боровик Р.А., Коршунов А.А. Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития // *Плодородие*. 2021. N 4. С. 77–82. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23>.

14. Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А. Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2017. N 3. С. 86–91.

15. Timilsena Y., Haque M., Adhikari B. Encapsulation in the food industry: a brief historical overview to recent developments // *Food and Nutrition Sciences*. 2020. Vol. 11, no. 6. P. 481–508. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.116035>.

16. Madlmeir S., Forger T., Trogrlic M., Jajcevic D., Kape A., Contreras L., et al. Quantifying the coating yield by modeling heat and mass transfer in a Wurster fluidized bed coater // *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 252. P. 117505. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117505>.

17. Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А. Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдоожиженном слое // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2019. Т. 62. N 5. С. 84–90. <https://doi.org/10.6060/ivkkt201962fp.5793>.

18. Lipin A.A., Lipin A.G. Particle coating with composite shell in a pan granulator // *Particulate Science and Technology*. 2022. Vol. 40, no. 1. P. 123–130. <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1927272>.

19. Li H., Liu D., Ma J., Chen X. Influence of cycle time distribution on coating uniformity of particles in a spray fluidized bed by using CFD-DEM simulations // *Particology*. 2023. Vol. 76. P. 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.08.010>.

20. Puga A.V., Gracia-Valls R., Fernandez-Prieto S., Smets J., York D. Dual xanthan gum/poly(vinyl acetate) or alkyl-functionalized poly(vinyl alcohol) films as models for advanced coatings // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol. 131, no. 19. <https://doi.org/10.1002/APP.40870>.

REFERENCES

1. Steber J. The ecotoxicity of cleaning product ingredients. In: *Handbook for cleaning/decontamination of surfaces*. Elsevier Science; 2007, p. 721–746. <https://doi.org/10.1016/B978-044451664-0/50022-X>.

2. Ruiz E.J., Ortega-Borges R., Jurado J.L., Chapman T.W., Meas Y. Simultaneous anodic and cathodic production of sodium percarbonate in aqueous solution. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2008;12(1). <https://doi.org/10.1149/1.3005555>.

3. Wada T., Nakano M., Koga N. Multistep kinetic behavior of the thermal decomposition of granular sodium percarbonate: hindrance effect of the outer surface layer. *Journal of Physical Chemistry A*. 2015;119(38):9749–9760. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.5b07042>.

4. Bracken J., Tietz D. Analysis of OxiClean: an interesting comparison of percarbonate stain removers. *Journal of Chemical Education*. 2005;82(5):762–764. <https://doi.org/10.1021/ed082p762>.

5. Tredwin C.J., Naik S., Lewis N.J., Scully C. Hydrogen peroxide tooth-whitening (bleaching) products: review of adverse effects and safety issues. *British Dental Journal*. 2006;200:371–376. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4813423>.

6. Bjørsvik H.R., Merinero J.A.V., Liguori L. Nitroarene catalyzed oxidation with sodium percarbonate or sodium perborate as the terminal oxidant. *Tetrahedron Letters*. 2004;45(47):8615–8620. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.09.156>.

7. Li B., Han Z., Ma J., Qiu W., Li W., Zhang B., et al. Novel sodium percarbonate-MnO₂ effervescent tablets for efficient and moderate membrane cleaning. *Water Research*. 2022;220:118716. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118716>.

8. Koukabi N. Sodium percarbonate: a versatile ox-

idizing reagent. *Synlett*. 2010;19:2969–2970. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1258997>.

9. Xu H., Pang Y., Li Y., Zhang Sh., Pei H. Using sodium percarbonate to suppress vertically distributed filamentous cyanobacteria while maintaining the stability of microeukaryotic communities in drinking water reservoirs. *Water Research*. 2021;197:117111. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117111>.

10. Wada T., Koga N. Kinetics and mechanism of the thermal decomposition of sodium percarbonate: Role of the surface product layer. *Journal of Physical Chemistry A*. 2013;117(9):1880–1889. <https://doi.org/10.1021/jp3123924>.

11. Medvedev A.G., Melnik E.A., Shabalova I.V., Mikhailov A.A., Khitrov N.V., Tripolskaya T.A., et al. Development of combined granulation and encapsulation process in production of sodium percarbonate. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017;51(4):515–522. <https://doi.org/10.1134/S004057951704011X>.

12. Vemmer M., Patel A.V. Review of encapsulation methods suitable for microbial biological control agents. *Biological Control*. 2013;67(3):380–389. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.09.003>.

13. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A. Slow and control-release fertilizers: brief history and modern trends. *Plodородie*. 2021;(4):77–82. (In Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23>.

14. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. Encapsulation of granules in polymer chambers as a method for creating mineral fertilizers with a controlled release rate of increase in increase. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*. 2017;(3):86–91. (In Russian).

15. Timilsena Y., Haque M., Adhikari B. Encapsu-

lation in the food industry: a brief historical overview to recent developments. *Food and Nutrition Sciences*. 2020;11(6):481-508. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.116035>.

16. Madlmeir S., Forgher T., Trogrlic M., Jajcevic D., Kape A., Contreras L., et al. Quantifying the coating yield by modeling heat and mass transfer in a Wurster fluidized bed coater. *Chemical Engineering Science*. 2022;252:117505. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117505>.

17. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. Assessment of coverage degree during granular material encapsulation in fluidized bed. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*. 2019;62(5):84-90. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Липин Андрей Александрович,
к.т.н., доцент,
Ивановский государственный
химико-технологический университет,
153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7,
Российская Федерация,
✉lipin.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7984-1691>

Липин Александр Геннадьевич,
д.т.н., профессор,
Ивановский государственный
химико-технологический университет,
153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7,
Российская Федерация,
157lipin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2011-9503>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.04.2023.
Одобрена после рецензирования 12.05.2023.
Принята к публикации 30.05.2023.

<https://doi.org/10.6060/ivkkt201962fp.5793>.

18. Lipin A.A., Lipin A.G. Particle coating with composite shell in a pan granulator. *Particulate Science and Technology*. 2022;40(1):123-130. <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1927272>.

19. Li H., Liu D., Ma J., Chen X. Influence of cycle time distribution on coating uniformity of particles in a spray fluidized bed by using CFD-DEM simulations. *Particuology*. 2023;76:151-164. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.08.010>.

20. Puga A.V., Gracia-Valls R., Fernandez-Prieto S., Smets J., York D. Dual xanthan gum/poly(vinyl acetate) or alkyl-functionalized poly(vinyl alcohol) films as models for advanced coatings. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(19). <https://doi.org/10.1002/APP.40870>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Lipin,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Ivanovo State University of Chemistry
and Technology,
7, Sheremetevskiy Ave., Ivanovo, 153000,
Russian Federation,
✉lipin.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7984-1691>

Aleksandr G. Lipin,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Ivanovo State University of Chemistry
and Technology,
7, Sheremetevskiy Ave., Ivanovo, 153000,
Russian Federation,
157lipin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2011-9503>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.04.2023.
Approved after reviewing 12.05.2023.
Accepted for publication 30.05.2023.