

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.23.022.346:544.723.5

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13287

Синтез новых композиционных суперабсорбентов с пористой структурой

Иван Андреевич Журавлев, Мария Сергеевна Лавлинская[✉],
Владислав Александрович Киселев, Андрей Викторович Сорокин

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, maria.lavlinskaya@gmail.com[✉]

Аннотация. Суперабсорбирующие полимеры или суперабсорбенты (САП) – класс гидрогелей, способных удерживать в себе количества воды в сотни или тысячи раз превосходящие их собственную массу. В настоящее время наиболее часто используемым типом этих материалов являются синтетические сетчатые полимеры, получаемые из мономеров акрилатного ряда. Массовое внедрение таких САП в народное хозяйство влечет за собой высокую антропогенную нагрузку на окружающую среду, что, несомненно, является негативным фактором, сдерживающим расширение масштаба их применения в различных областях деятельности человека, особенно – в сельском хозяйстве. Перспективным решением этой проблемы является использование композиционных суперабсорбентов – гидрогелей, сочетающих в своем составе как акрилатные, так и биоразлагаемые, чаще всего – полисахаридные, звенья. Такие полимеры характеризуются более высокой экологичностью по сравнению с синтетическими аналогами. Однако в химии композиционных суперабсорбентов существует проблема обратной зависимости степени набухания от содержания полисахаридной фракции: чем выше содержание биodeградируемых звеньев в составе суперабсорбента, т.е. чем выше его экологичность, тем меньшее количество влаги такой полимер может поглотить.

В настоящей статье рассматривается один из возможных подходов решения указанной проблемы, а именно попытка увеличить степень набухания композиционного суперабсорбента на основе натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы путем придания пористой структуры получаемому суперабсорбирующему материалу. Результат достигался за счет введения в реакционную массу непосредственно в ходе синтеза порогена – карбоната аммония. Образование пористой структуры под действием вносимого агента подтверждали методом сканирующей электронной микроскопии. Найдено, что внесение порообразующей добавки в количестве 5% масс. приводит к образованию относительно равномерно распределенных пор диаметром 10-15 мкм. Определение равновесной степени набухания синтезированных суперабсорбентов показало, что придание пористой структуры композиционному САП приводит к увеличению параметра на 26% по сравнению с немодифицированным образцом. Обработка данных временной зависимости набухания с помощью математических кинетических моделей показала, что гидратация суперабсорбента протекает не только на поверхности, но и в объеме полимера, сопровождаемая аномальной нефиковской диффузией молекул воды в фазе суперабсорбента. Эта закономерность наблюдается для обоих исследуемых образцов, однако в случае пористого САП процесс гидратации протекает несколько быстрее.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что использование пороенов и придание пористой структуры композиционным суперабсорбентам может быть использовано как эффективный способ увеличения их равновесной степени набухания.

Ключевые слова: композиционные суперабсорбенты, равновесная степень набухания, порообразование, морфология поверхности

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке программы Российского научного фонда, проект № 24-73-00251. Данные растровой электронной микроскопии получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

Для цитирования: Журавлев И.А., Лавлинская М.С., Киселев В.А., Сорокин А.В. Синтез новых композиционных суперабсорбентов с пористой структурой // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 4. С. 595-605. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13287>

Original article

Synthesis of composite superabsorbents with the porous structure

Ivan A. Zhuravlev, Maria S. Lavlinskaya[✉], Vladislav A. Kiselev, Andrey V. Sorokin

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, maria.lavlinskaya@gmail.com[✉]

Abstract. Superabsorbent polymers (SAPs) are a class of hydrogels capable of retaining water in amounts hundreds to thousands of times their own weight. Currently, the most widely used SAPs are synthetic, cross-linked polymers derived from acrylate monomers. However, the large-scale introduction of these materials into the industry imposes a significant anthropogenic burden on the environment, which is a key limiting factor for their broader application, particularly in agriculture.

A promising approach to addressing this issue is the development of composite superabsorbents – hydrogels that incorporate both acrylate and biodegradable components, most commonly polysaccharides. These materials exhibit greater environmental compatibility compared to fully synthetic counterparts. However, a major challenge in composite SAP chemistry is the inverse correlation between the swelling degree and the content of the polysaccharide component: the higher the proportion of biodegradable links – and thus the greater the ecofriendliness – the lower the water absorption capacity of the material.

This study explores one potential solution to this problem: enhancing the swelling capacity of a composite SAP based on sodium carboxymethyl cellulose by introducing a porous structure into the polymer network. This was achieved through the incorporation of a porogen, ammonium carbonate, directly into the reaction mixture during synthesis. The formation of the porous structure induced by the porogen was confirmed via scanning electron microscopy. The introduction of 5 wt.% of the pore-forming agent resulted in the formation of relatively uniformly distributed pores with diameters of 10–15 μm .

Equilibrium swelling measurements demonstrated that the introduction of porosity increased the swelling capacity by 26% compared to the non-porous control sample. Kinetic analysis of swelling behavior using mathematical models revealed that water absorption in the SAP occurs not only on the surface but also within the bulk of the polymer, involving anomalous non-Fickian diffusion. This behavior was observed for both tested samples, although hydration proceeded slightly faster in the porous SAP.

In summary, this study demonstrates that the use of porogens to create porous structures in composite superabsorbents is an effective strategy for enhancing their equilibrium swelling performance.

Keywords: composite superabsorbent, equilibrium swelling ratio, pore forming, surface morphology.

Acknowledgments: this research was funded by Russian Science Foundation, project RSF-24-73-00251. SEM data were obtained with use of the equipment of the Research Core Center of Voronezh State University..

For citation: Zhuravlev I.A., Lavlinskaya M.S., Kiselev V.A., Sorokin A.V. Synthesis of composite superabsorbents with the porous structure. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(4): 595-605. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13287>

Введение

Суперабсорбенты (САП) представляют собой особый класс полимерных материалов, способных эффективно впитывать и удерживать значительные по отношению к собственной массе количества жидкости [1]. На сегодняшний день они имеют несколько основных областей применения, среди которых – сельское хозяйство, нефтедобывающая промышленность, изготовление гигиенических изделий и строительство [2-4], а объемы ежегодного производства суперабсорбентов измеряются миллионами тонн: так, по

состоянию на октябрь 2020 года это значение превысило 4 миллиона тонн [5]. Следует отметить, что основная часть производимых суперабсорбентов представляет собой синтетические акрилатные полимеры, массовое использование которых характеризуется высокой экологической нагрузкой на окружающую среду. Такие суперабсорбенты не разлагаются в природных условиях, что приводит к механическому загрязнению почвы, а также к снижению ее качества и плодородия. В связи с этим все больший интерес привлекают композиционные суперабсорбенты, имеющие в своем составе биоразлагаемые фрагменты, в частности

– модифицированные полисахариды, такие как гидроксипропил- или карбоксиметилцеллюлоза [6, 7].

Отличительной чертой суперабсорбентов на основе полисахаридов является их способность к деградации под воздействием микроорганизмов [8–10]. Помимо этого, можно выделить еще одно их весомое преимущество – возможность производства таких САП из отходов деревообрабатывающей, текстильной или сельскохозяйственной промышленности. Такой подход позволяет снизить количество промышленных отходов, а также более полно использовать природное сырье. В связи с этим рассматриваемое направление исследований становится все более актуальным в контексте растущего интереса к разработке биоразлагаемых материалов с высокой водопоглощающей способностью.

Однако суперабсорбенты на основе природных материалов не лишены недостатков. Одной из основных проблем является их меньшая, по сравнению с синтетическими аналогами, способность к влагоудержанию, которая, к тому же, снижается с увеличением содержания в них полисахаридного компонента [11, 12]. В связи с этим, поиск способов улучшения указанной характеристики представляет как фундаментальный, так и практический интерес.

В настоящий момент известны различные подходы к улучшению характеристик суперабсорбентов: так, одним из них является формирование материалов с более пористой структурой и развитой поверхностью [13]. Этот процесс способствует упрощению проникновения молекул воды в фазу полимера и их последующему взаимодействию с центрами, связывающими воду, что приводит к более полному использованию возможностей полимерного материала.

В настоящем исследовании мы сосредоточились на повышении эффективности водопоглощения суперабсорбентов,

содержащих в своем составе модифицированный полисахарид – натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Для достижения этой цели предложено вносить изменения в структуру материала за счет добавления порообразователя карбоната аммония. Ожидается, что выделяющиеся при его разложении аммиак и углекислый газ будут образовывать в объеме и на поверхности суперабсорбента поры различных размеров, способствуя увеличению площади поверхности материала [14–18], что, в свою очередь, приведет к повышению водопоглощения полимеров.

Экспериментальная часть

Для синтеза суперабсорбентов применялись следующие реагенты: карбоксиметилцеллюлозы натриевая соль (КМЦ, марка 75В, молекулярная масса 90 кДа, степень замещения 0.7, Реакхим, РФ), акриловая кислота и акриламид (оба extra pure, >98%, Sigma Aldrich, Германия). В качестве инициатора использовался пероксодисульфат калия (ПСК), сшивателя – *N,N'*-метилен-бис-акриламид (МБАА; оба extra pure, >98%, Acros Organics, Германия). Карбонат аммония (ЧДА, Вектон, РФ) применяли в качестве порообразующего агента. Калия гидроксид (ЧДА, Вектон, РФ) использовали для получения калиевой соли акриловой кислоты.

Непосредственно перед синтезом акриловая кислота очищалась вакуумной дистилляцией ($T=45^{\circ}\text{C}$, $p=15$ мм.рт.ст.), акриламид и МБАА перекристаллизовывали из этилацетата, персульфат калия – из дистиллированной воды. КМЦ, карбонат аммония и гидроксид калия использовали без дополнительной очистки.

Для получения акрилата калия акриловая кислота нейтрализовалась гидроксидом калия на 70% мольн. Реакция проводилась при активном перемешивании и охлаждении во избежание самопроизвольной полимеризации мономера.

Синтез суперабсорбентов осуществлялся следующим образом: 1 г КМЦ по-

мешали в реактор, оснащенный магнитной мешалкой, и растворяли в 15 см³ дистиллированной воды при постоянном интенсивном перемешивании. Затем внесли раствор, содержащий 12 см³ воды, 3 см³ акриловой кислоты, 1 г акриламида, 0.05 г персульфата калия, 0.0025 г МБАА. После образования гомогенной системы реакционную смесь выдерживали на водяной бане при температуре 70°C в течение 2 часов. По окончании синтеза полученный гель выдерживали в водно-спиртовом растворе (вода:изопропиловый спирт = 3:1 об.) в течение суток, и сушили при температуре 45 °С до постоянной массы и измельчали до частиц размером 1-3 мм с произвольной формой. Для получения образцов суперабсорбентов с пористой структурой процесс осуществляли аналогичным образом, но в реакционную массу непосредственно перед началом синтеза добавлялось 0.22 г карбоната аммония, что соответствует 5% масс. от количества используемых реагентов. Выход продуктов составлял 78-85%.

Для подтверждения структуры синтезированных САП использовали метод ИК-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на спектрометре IRAffinity1(Shimadzu Scientific Instruments, Япония) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием приставки, оснащенной призмой из ZnSe. Диапазон регистрации составлял 900-4000 см⁻¹, спектральное разрешение – 4 см⁻¹. Образцы непосредственно перед регистрацией спектров повторно высушивали в сушильном шкафу при 45°C до постоянной массы и тщательно измельчали до размера частиц менее 50 мкм.

Исследование морфологии поверхности полученных суперабсорбентов осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии с использованием прибора Jeol JSM-6380LV (Jeol Ltd., Япония). Анализируемые образцы были предварительно покрыты слоем золота

толщиной 10 нм. Для определения средней площади пор микрофотографии пористого суперабсорбента обрабатывали с помощью ПО ImageJ.

Пористость образцов определялось методом вытеснения жидкости согласно [19]. Пористость, P , %, рассчитывалась по следующей формуле:

$$P = \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3}, \quad (1)$$

где V_1 , V_2 , V_3 – объем циклогексана, в который был помещен образец; объем циклогексана, занявшего поры образца, и остаточный объем циклогексана после извлечения образца, мл, соответственно.

Для определения степени набухания синтезированных САП навеска образца массой 0.10-0.11 г помещалась в 500 см³ дистиллированной воды (рН=6.5±0.3; T=25±2°C) и выдерживались в статических условиях определенное время. Затем набухший полимер отделялся от воды для дальнейшего определения его массы. Расчет равновесной степени набухания, Q_e , и степени набухания в момент времени t , Q_t , производился по следующей формуле:

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{m_0}, \quad (2)$$

где m_1 и m_0 – массы набухшего и сухого образцов, г, соответственно.

Для выявления влияния добавки карбоната аммония на особенности поглощения воды суперабсорбентами (т.е. их гидратации) проведены исследования временных зависимостей набухания $Q_t = f(t)$ с последующей обработкой полученных данных с помощью математических моделей формальной кинетики, широко используемых для описания процессов гидратации суперабсорбентов [20-23].

1. Кинетическая модель гидратации псевдопервого порядка предполагает, что только поверхностная гидратация определяет суммарную скорость процесса гидратации и не рассматривает процесс в объеме суперабсорбента [24-26]:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t, \quad (3)$$

2. Кинетическая модель гидратации псевдовторого порядка является более

гибкой по сравнению с предыдущей и предполагает, что общая скорость гидратации контролируется не только поверхностным процессом, но и диффузией воды в фазе или порах суперабсорбента, т.е. гидратация протекает и в объеме САП [27, 28]:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e}, \quad (4)$$

Информация, которая может быть получена с их использованием, позволяет сделать вывод, определяется ли суммарная скорость процесса гидратации суперабсорбента только взаимодействием на поверхности или комбинацией процессов на поверхности и в объеме суперабсорбента [28].

3. Степенная модель позволяет определить тип диффузии молекул воды (фиковская или нефиковская) в фазе суперабсорбента [29]:

$$F = \frac{Q_t}{Q_e} = k \times t^n, \quad (5)$$

или в логарифмической форме:

$$\ln F = \ln Q_t - \ln Q_e = \ln k + n \ln t, \quad (6)$$

где k_1 или k_2 – константа скорости гидратации псевдопервого или псевдовторого порядка, $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$; F – фракционная степень набухания в момент времени t ; k – структурный параметр, n – степенной показатель, отражающий тип диффузии. Если $n=0.5$, то наблюдается фиковская диффузия, при которой скорость диффузии воды намного меньше скорости релаксации; если $0.5 < n < 1$, то говорят о нефиковской аномальной диффузии, при которой скорости диффузии воды и релаксации полимерной сетки примерно одинаковы; если $n < 0.5$, то скорость диффузии значительно превышает скорость релаксации полимерной сетки [29].

Все полученные экспериментальные результаты обрабатывали с помощью ПО MS Excel, и представляли в виде среднее значение \pm стандартное отклонение, рассчитанные из результатов трех независимых экспериментов ($n=3$, $P=0.95$).

Обсуждение результатов

Суперабсорбенты получали свободно-радикальной полимеризацией в водной среде при температуре 70°C с использованием вещественного инициирования. В качестве источника биоразлагаемых звеньев была выбрана натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы – модифицированный полисахарид, получаемый карбоксиметилированием целлюлозы, преимущественно, растительного происхождения – самого распространенного биополимера. Соотношения реагентов были выбраны на основе ранее проведенного исследования [30] как обеспечивающие максимальную величину равновесной степени набухания.

Механизм образования целевого продукта – суперабсорбирующего гидрогеля – включает в себя ряд стадий:

- иницирование, заключающееся в образовании в результате термического разложения персульфата калия сульфат-ион-радикалов, в дальнейшем взаимодействующих с КМЦ, сомономерами и сшивающим агентом с образованием центров радикальной полимеризации на молекулах акрилатов и ОН-группах пиранозных колец полисахарида;

- рост цепи, включающий в себя хаотичное присоединение перечисленных выше (макро)радикалов и сопровождающийся разветвлением линейных молекул КМЦ за счет прививки акрилатных цепей;

- обрыв цепи, протекающий преимущественно рекомбинацией и приводящий к образованию трехмерной структуры полимерного геля.

Учитывая достаточно высокие значения выходов продуктов полимеризации (более 78 %) можно сделать вывод о том, что значительная часть используемых реагентов вступает в целевую реакцию образования суперабсорбента, однако, побочные процессы, такие как гомо- и сополимеризация акрилатов, также протекают в рассматриваемых условиях.

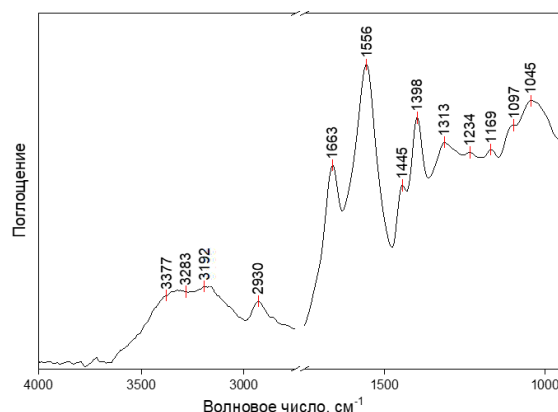


Рис. 1. Типичный ИК-спектр синтезированного суперабсорбента
Fig. 1. Typical FTIR-spectrum of the superabsorbent obtained

Для подтверждения структуры полученных суперабсорбентов применяли метод НПВО-Фурье-ИК-спектроскопии. Типичный ИК-спектр полученного соединения (рис. 1) содержит следующие характеристические полосы поглощения: сложная комплексная полоса с выраженными максимумами при 1045 и 1097 cm^{-1} отражает колебания С-О, в том числе, колебания связей С-О-С пиранозного цикла и связей С-ОН КМЦ [31]; полосы при 1313 (ρCH_2 карбоксиметильных групп) и 1445 cm^{-1} , описывающие колебания диссоциированных карбоксильных групп остатков КМЦ и акриловой кислоты [31], при 1556 cm^{-1} – асимметричные валентные колебания карбоксилат-ионов [32]; 1663 cm^{-1} – амид I остатков акриламида и сшивающего агента [33], при 2930 и 3192 cm^{-1} – колебания метиленовых групп и ассоциированных гидроксильных групп остатков целлюлозы и связанных с полимером молекул воды соответственно [12, 34, 35]. Полученные данные позволяют судить о вхождении в состав полимера используемых компонентов.

В настоящей работе предпринята попытка повышения равновесной степени набухания композиционного суперабсорбента на основе натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в дистиллированной воде за счет формирования более развитой пористой структуры полимера. Исследование названной характеристики полученных продуктов осуществлялось

методом сканирующей микроскопии. Так, для образца, синтезированного без добавления порообразователя (рис. 2 а,б), характерна относительно гладкая поверхность с ровными слоистыми следами сколов, образуемых в результате механического измельчения полимера. Для суперабсорбента, полученного в присутствии карбоната аммония (рис. 2 в,г), отчетливо видно формирование развитой поверхностной структуры с неоднородными по размерам округлыми порам. Средний диаметр пор, определенный путем обработки изображений с помощью ПО ImageJ, лежит в диапазоне 10-15 мкм, площадь – $374 \pm 101 \text{ мкм}^2$.

Данные электронной микроскопии коррелируют с результатами исследования пористости образцов, осуществленного методом вытеснения жидкости. Установлено, что только $9 \pm 1\%$ объема образца, полученного без карбоната аммония, занимают поры, в то время как для суперабсорбента, синтезированного в присутствии порогена, эта величина составляет $78 \pm 5\%$. Результаты этого исследования показывают эффективность использования карбоната аммония для получения суперабсорбирующих материалов с пористой структуры.

Анализ данных по определению равновесной степени набухания синтезированных образцов показывает повышение равновесной степени набухания для пористого САП на 26%. Так, значение Q_e для

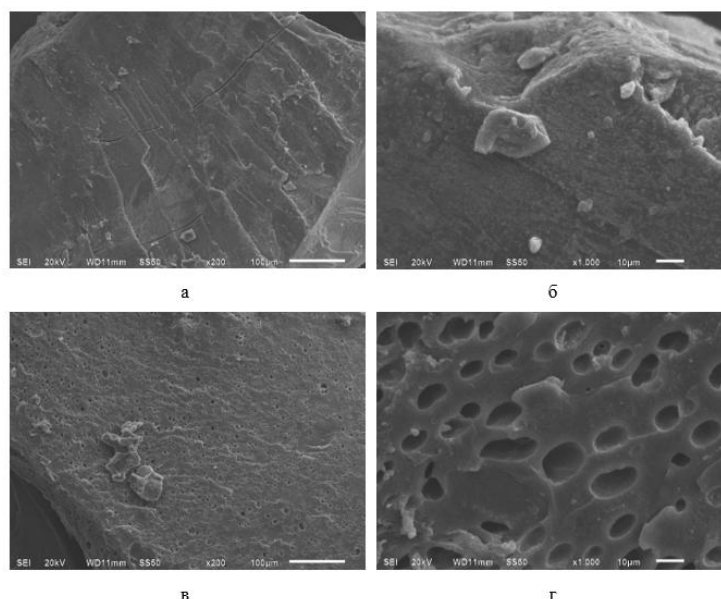


Рис. 2. Микрофотографии поверхности суперабсорбентов: а, б – синтезированных без порообразователя; в, г – с добавлением порообразователя карбоната аммония.

Fig. 2. The SEM images of SAPs synthesized without porogen (а, б); SAPs synthesized with porogen (в, г)

непористых суперабсорбентов составляет 571 ± 7 г/г, для пористых – 725 ± 9 г/г.

Помимо определения равновесной степени набухания практический и научный интерес представляет исследование временных закономерностей этого процесса. На рисунке 3а представлены временные зависимости степени набухания исследуемых суперабсорбентов. Кинетические кривые обоих образцов имеют схожую форму, соответствующую аномальной нефииковской диффузии [29]. На профилях выделяются две стадии набухания – быстрая, протекающая с 1 до 90 мин, затем – этап медленного набухания (до 150 мин), завершение которого сопровождается достижением равновесного состояния. Отдельно стоит отметить, что скорость процесса набухания для суперабсорбента, полученного в присутствии порогена, несколько выше, чем для полимера, синтезированного без применения карбоната аммония.

Известно, что изменение морфологии структуры суперабсорбента может оказывать влияние на особенности его гидратации [36]. В связи с этим следующим этапом исследования являлась обработка

экспериментальных данных временной зависимости гидратации с помощью некоторых кинетических моделей: степенной, псевдопервого и псевдовторого порядка. Соответствие поведения образца той или иной модели оценивалось по значению коэффициента детерминации R^2 . Установлено, что для суперабсорбентов, полученных как в присутствии карбоната аммония, так и без него, наиболее адекватно экспериментальные данные описываются моделью псевдовторого порядка. Это указывает на тот факт, что гидратация суперабсорбентов происходит не только на поверхности частиц, но и в его объеме за счет диффузии молекул воды внутрь фазы суперабсорбента и их последующей «фиксации» на функциональных группах суперабсорбентов. В рассматриваемом случае речь преимущественно идет об образовании водородных связей между молекулами воды и гидроксильными, карбоксильными и амидными группами сетки суперабсорбента. Таким образом, эти взаимодействия контролируют гидратацию суперабсорбента, а электростатическое отталкивание диссоциированных функциональных групп, в

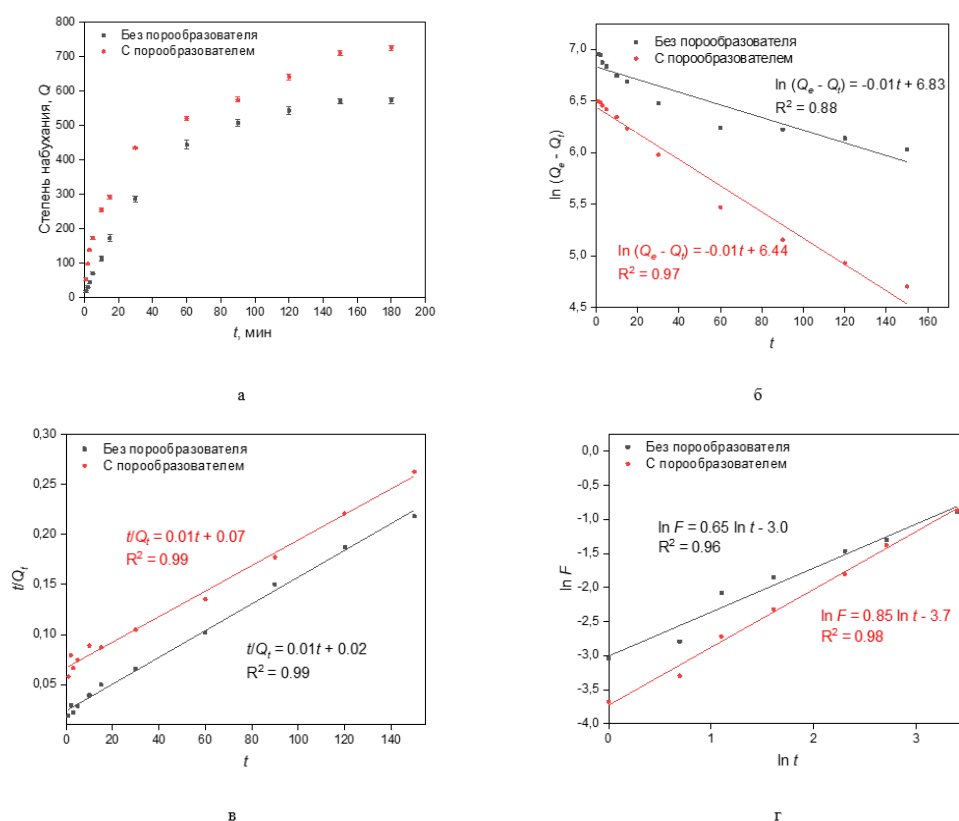


Рис. 3. а – кинетические кривые гидратации суперабсорбентов; б – д: обработка экспериментальных данных по временной зависимости гидратации математическими кинетическими моделями: б – модель псевдопервого порядка; в – модель псевдовторого порядка; г – степенная модель.

Fig. 3. a is the hydration kinetic profiles of superabsorbents; б – д: processing of the experimental data by the kinetic mathematical models: б is pseudo-first-order model; в is pseudo-second-order model; г is power-law model.

Таблица. Некоторые параметры кинетических моделей гидратации для полученных суперабсорбентов.

Table. Parameters of the hydration kinetic models for superabsorbents obtained.

Образец	Кинетическая модель					
	псевдопервого порядка		псевдовторого порядка		степенная	
	R^2	k_1	R^2	k_2	R^2	n
Без порообразователя	0.88	0.01	0.99	0.01	0.96	0.65
С порообразователем	0.97	0.01	0.99	0.01	0.98	0.85

первую очередь – карбоксильных, являющихся движущей силой процесса набухания исследуемых полимеров [37].

Таким образом, способ и скорость проникновения молекул воды в структуру суперабсорбента, т.е. тип их диффузии, также оказывает влияние на процесс гидратации суперабсорбента. Для исследования этого фактора использовались данные, полученные с помощью степенной модели, а именно – значения степенного

параметра n , определяемого графически (рис. 3г; таблица). Важно отметить, что наиболее точный результат рассматриваемая модель дает в случае обработки экспериментальных данных на ранних и средних стадиях набухания (60% и менее). Для исследуемых суперабсорбентов величина параметра n соответствуют условию $0.5 < n < 1$ (таблица), т.е. нефиковской аномальной диффузии, при которой скорости диффузии воды и релаксации

полимерной сетки сопоставимы [29]. В целом, такое поведение было ожидаемым, т.к. в условиях проведения эксперимента ($T=25^{\circ}\text{C}$) суперабсорбенты находятся в стеклообразном состоянии [29] ($T_g \sim 190\text{--}200^{\circ}\text{C}$ [12, 38]).

Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что добавка порообразующего агента карбоната аммония непосредственно во время синтеза композиционного суперабсорбирующего полимера на основе натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы способствует формированию пористой структуры, приводящей к повышению его равновесной степени набухания на 26% по сравнению с образцом, не содержащим пор. Исследование гидратации суперабсорбента

не выявило существенного влияния присутствия порога на этот процесс, который, как и в случае непористого САП, протекает не только на поверхности, но и в объеме частиц полимера, причем диффузия воды в фазе суперабсорбента является аномальной нефиковской. В целом, проведенное исследование однозначно показывает, что использование порога является доступным и эффективным способом повышения равновесной степени набухания композиционных суперабсорбентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Horie K., Máximo B., Fox R. B., He J., Hess M., Kahovec J., Kitayama T., Kubisa P., Maréchal E., Mormann W., Stepto R. F. T., Tabak D., Vohlidal J., Wilks E. S., Work W. J., *Pure Appl. Chem.*, 2004; 76: 889-906. <https://doi.org/10.1351/pac200476040889>
2. Li S., Gang C., *J. Clean. Prod.*, 2020; 251: 119669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119669>
3. Ahmed E.M., *J. Adv. Res.*, 2015; 6: 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
4. Schröfl C., Erk K.A., Siriawatwechakul W., Wyrzykowski M., Snoeck D., *Cem. Concr. Res.*, 2022; 151: 106648. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106648>
5. Superabsorbent Polymer Market Analysis: Industry Market Size, Plant Capacity, Production, Operating Efficiency, Demand & Supply, End-User Industries, Sales Channel, Regional Demand, Company Share, Foreign Trade, Manufacturing Process, Policy and Regulatory Landscape, 2015-2030. Available at: <https://www.chemanalyst.com/industry-report/superabsorbent-polymer-market-727> (accessed 29.09.2024);
6. Cao Q., Chen J., Wang M., Wang Z., Wang W., Shen Y., Xue Y., Li B., Ma Y., Yao Y., Wu H., *Carbohydr. Polym.*, 2024; 331: 121910. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121910>
7. Fekete T., Borsa J., Takács E., Wojnarovits L., *Carbohydr. Polym.*, 2017; 166: 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.108>
8. Nie H., Liu M., Zhan F., Guo M., *Carbohydr. Polym.*, 2004; 58(2): 185-189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.035>
9. Sohail Y., Muhammad H., Munir H., Awais M., Song Y., Zheng Q., Shabbir H. G., Xiaowei L., Yang L., Jianfeng S., Chaohua G., *Sustain. Mater. Technol.*, 2024; 40: e00947. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00947>
10. Beti V., Ana O., Blaž S., Blaž L., Uroš N., *Int. J. Biol. Macromol.*, 2023; 252: 126433. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126433>
11. Siwen B., Zhuang Z., Zhenzhen Y., Zitong S., Jiahui C., Jintao H., Haoxiang J., Tianhao Q., Peng Y., Bin T., *Carbohydr. Polym.*, 2023; 322: 121312. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121312>
12. Sorokin A., Sukhanov P., Popov V., Kannykin S., Lavlinskaya M., *Cellulose*, 2022; 29: 159-173. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04326-3>
13. Sorokin A., Lavlinskaya M., *Polym. Bull.*, 2022; 79: 407-427. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03521-9>
14. Futterer T., Vermter H., Vissemborsky R., Shnee R., Kjummet D. Patent RF, No 2542279, 2010.
15. Ren Z., Kong D., Wang K., Zhang W., *J. Mater. Chem. A*, 2014; 2: 17952-17961. <https://doi.org/10.1039/C4TA03024A>

16. Ma L., Lv H., Yu H., Kong L., Zhang R., Guo X., Jin H., He G., Liu X., *Chin. J. Chem. Eng.*, 2020; 33: 286-296. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.032>
17. Pardeshi S., Dhodapkar R., Kumar A., *Compos. Interfaces*, 2013; 21: 13-30. <https://doi.org/10.1080/15685543.2013.830515>
18. Locs J., Zalite V., Berzina-Cimdina L., Sokolova M., *J. Eur. Ceram.* 2013; 33: 3437-3443. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2013.06.010>
19. Nie L., Chen D., Fu J., Yang S., Hou R., Suo J., *Biochem. Eng. J.*, 2015; 98: 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.02.026>
20. Huang Y., Zeng M., Ren J., Wang J., Fan L., Xu Q. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2012; 401: 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.03.031>
21. Thakur S., Pandey S., Arotiba O.A. *Carbohydr. Polym.* 2016; 153: 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.104>
22. Cheng S., Lei Z., Zhang L., Zhang Y., Liu Y., Wang B., Wang Y. *Carbohydr. Polym.* 2019; 225: 115214. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115214>
23. Sorokin A., Lavlinskaya M., *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*, 2023; 23(5): 938-947. <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11728>
24. Lagergreen S., Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe, *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, 1907; 2: 15. <https://doi.org/10.1007/bf01501332>
25. Rudzinski W., Plazinski W., *J. Phys. Chem. B.* 2006; 110: 16514-16525. <https://doi.org/10.1021/jp061779n>
26. Vareda J. P. *J. Mol. Liq.* 2023; 76: 121416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121416>
27. Ho Y. S., McKay G., *Process Biochemistry*, 1999; 34: 451-465. [https://doi.org/10.1016/s0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/s0032-9592(98)00112-5)
28. Plazinski W., Dziuba J., Rudzinski W. *Adsorption*. 2013; 19: 1055-1064. <https://doi.org/10.1007/s10450-013-9529-0>
29. Crank J. *The mathematics of diffusion*. London, Oxford University Press, 1975, 421 p.
30. Fang S., Wang G., Li P., Xing R., Liu S., Qin Y., Yu H., Chen X., Li K., *Int. J. Biol. Macromol.*, 2018; 115: 754-761. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.0>
31. Ariaeenejad S., Hosseini E., Motamedi E., Moosavi-Movahedi A.A., Salekdeh G.H. *Chem. Eng. J.* 2019; 375: 122022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122022>
32. Bellamy L.J. *The Infrared Spectra of Complex Molecules*. 1st Edition, Springer Netherlands, Dordrecht, 1975. 190 p.
33. Zhou Y., Fu S., Zhang L., Zhan H., *Carbohydr. Polym.*, 2013; 97: 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.088>
34. Sorokin A.V., Goncharova S.S., Lavlinskaya M.S., Holyavka M.G., Faizullin D.A., Kondratyev M.S., Kannykin S.V., Zuev Y.F., Artyukhov V.G., *Polymers*, 2023; 15: 649. <https://doi.org/10.3390/polym15030649>
35. Sorokin A.V., Goncharova S.S., Lavlinskaya M.S., Holyavka M.G., Faizullin D.A., Zuev Y.F., Kondratyev M.S., Artyukhov V.G., *Int. J. Mol. Sci.*, 2023; 24: 11246. <https://doi.org/10.3390/ijms241411246>
36. Lavlinskaya, M.S., Sorokin, A.V., *Properties and Applications of Superabsorbent Polymers*, 2023; 24: 19-39. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1102-8_2
37. Peppas, N., *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2000; 50: 27-46. [https://doi.org/10.1016/s0939-6411\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/s0939-6411(00)00090-4)
38. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V. Enhancement of water uptake in composite superabsorbents based on carboxymethyl cellulose through porogen incorporation and lyophilization. *Gels*. 2024; 10(12): 797. <https://doi.org/10.3390/gels10120797>

Информация об авторах / Information about the authors

И.А. Журавлев – студент и лаборант-исследователь кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии Воронежского государственного университета; лаборант-исследователь кафедры биофизики и биотехнологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

I.A. Zhuravlev – Student and Laboratory Assistant of Polymer Science and Colloid Chemistry Department of Voronezh State University; Laboratory Assistant of Biophysics and Biotechnology Department of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ivan.geranos@yandex.ru



М.С. Лавлинская – к.х.н., старший научный сотрудник кафедры биофизики и биотехнологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

В.А. Киселев – студент кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

А.В. Сорокин – к.б.н., старший научный сотрудник и доцент кафедры высокомолекулярных соединений Воронежского государственного университета, старший научный сотрудник кафедры биофизики и биотехнологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

M.S. Lavlinskaya – PhD (Chem), Senior Researcher of Biophysics and Biotechnology Department of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: maria.lavlinskaya@gmail.com

V.A. Kiselev – Student of Polymer Science and Colloid Chemistry Department of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: Kiselev_vladislav04@mail.ru

A.V. Sorokin – PhD (Biol) Senior Researcher and Associate Professor of Polymer Science and Colloid Chemistry Department of Voronezh State University, Senior Researcher of Biophysics and Biotechnology Department of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: andrew.v.sorokin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 03.09.2025.

The article was submitted 22.10.2024; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 03.09.2025.