

притяжения к источнику градиентного магнитного поля. Зависимость силы притяжения от напряженности поля прямо пропорциональная и близка к линейной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Минздрава РФ (№ 121032300335–1).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Polyacrylamide Ferrogels with Magnetite or Strontium Hexaferrite: Next Step in the Development of Soft Biomimetic Matter for Biosensor Applications / Safronov A. P., Mikhnevich E. A., Lotfollahi Z. et al. // *Sensors (Basel)*. – 2018; 18(1): 257.
2. Improved magnetic regulation of delivery profiles from ferrogels / Kennedy S., Roco C., Déléris A. et al. // *Biomaterials*. – 2018; 161: 179-189.
3. Wei L., Henning M., Magali C. Application of Alginate Hydrogels for Next-Generation Articular Cartilage Regeneration. *Int. J. Mol. Sci.* – 2022; 23(3): 1147.
4. Проектирование эксперимента для создания средств адресной доставки лекарств на основе феррогелей / Мельников Г. А., Сосян Д. А., Мелкозеров Д. А. и др. // *Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: сборник статей V Международной (75 Всероссийской) научно-практической конференции*. – 2020. – Т. 1. – С. 177–182.

Сведения об авторах

Д.В. Кузнецова – студент

И.О. Ярышев – студент

А.П. Сафронов – доктор физико-математических наук, профессор

Ф.А. Бляхман – доктор биологических наук, профессор

Information about the authors

D.V. Kuznetsova – undergraduate student

I.O. Yaryshev – undergraduate student

A.P. Safronov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor

F.A. Blyakhman – Doctor of Science (Biology), Professor

УДК: 577.114.5

ПОГЛОЩЕНИЕ ВОДЫ ГИДРОГЕЛЯМИ АЛЬГИНАТА КАЛЬЦИЯ

Надежда Михайловна Курилова¹, Александр Петрович Сафронов²

^{1,2}ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

¹nadyakurilova98@yandex.ru

Аннотация

Введение. Альгинаты нашли различные применения в области биотехнологии, медицины и тканевой инженерии. **Цель исследования** – синтез и исследование процесса поглощения воды гидрогелями альгината кальция в зависимости от степени ее предварительного удаления и от времени. **Материалы и методы.** Гидрогели альгината кальция были синтезированы путем натрий-кальциевого

ионного обмена из водного раствора альгината натрия. **Результаты.** Исследовано поглощение воды гидрогелями в зависимости от степени их предварительного высушивания. **Обсуждение.** Показано, что после полного высушивания альгинат кальция теряет способность поглощать воду в прежнем количестве: его степень набухания в воде уменьшается на порядок. **Выводы.** Кинетика набухания гидрогелей альгината кальция описывается двойной экспоненциальной функцией времени.

Ключевые слова: альгинат кальция, гидрогели, кинетика набухания.

ABSORPTION OF WATER BY CALCIUM ALGINATE HYDROGELS

Nadezhda M. Kurilova¹, Alexander P. Safronov²

^{1,2}Ural federal university, Yekaterinburg, Russia

¹nadyakurilova98@yandex.ru

Abstract

Introduction. Alginates found various applications in the field of biotechnology, medicine and engineering. **The aim of the study** – the synthesis and investigation of the water absorption process by calcium alginate hydrogels. **Materials and methods.** Calcium alginate hydrogels were synthesized via calcium-sodium ionic exchange from sodium alginate water solution. **Results.** Water absorption by hydrogels had been studied as a function of their pre-drying. **Discussion.** It was shown that completely dried calcium alginate lost its ability to restore water uptake. **Conclusions.** The kinetics of swelling of calcium alginate hydrogels was governed by a double exponential function of time.

Keywords: calcium alginate, hydrogels, swelling kinetics.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время появился интерес к изучению альгинатов, которые нашли различные применения в области биотехнологии, медицины и тканевой инженерии. Альгинаты – это полисахариды, которые можно получить из морских водорослей или бактерий.

Альгинаты представляют собой линейный сополимер, состоящий из замещенных звеньев β -D-маннуровой кислоты (M) и α -L-гулуровой кислоты (G).

Применение альгинатов основано на их гелеобразующих свойствах с катионами двух- и трехвалентных металлов. Преимущественно используются ионы Ca^{2+} , поскольку их токсичность ниже, чем у катионов других металлов. Альгинат кальция в виде геля особенно используется в качестве матрицы для доставки лекарств, в виде раневых повязок, которые ускоряют заживление, не давая ране высохнуть и минимизируя риски заражения [1–3].

Цель исследования – синтез и исследование процесса поглощения воды гидрогелями альгината кальция в зависимости от степени ее предварительного удаления и от времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным веществом служил альгинат натрия в виде порошка производства SigmaAldrich. Молекулярная масса, которая составила 190 кДа,

была определена вискозиметрическим методом при 25 °С с помощью констант Марка–Хаувинка [4]: $K = 2,3 \times 10^{-2}$, $a = 0,984$.

Синтез гидрогелей альгината кальция в виде пленок проводили из заранее приготовленных 5% водных растворов альгината натрия и 0,1 М водных растворов хлорида кальция. Необходимое количество водного раствора альгината натрия распределяли равномерно на чашке Петри, после чего покрывали водным раствором хлорида кальция. Полученные гидрогели альгината кальция выдерживали в течение 1 суток в растворе хлорида кальция, затем промывали в дистиллированной воде. Равновесную степень набухания гелей альгината кальция определяли весовым методом. Для этого рассчитывали отношение массы поглощенной воды гелем к массе высушенного при 70 °С геля.

Были приготовлены образцы гелей альгината кальция с различной исходной степенью набухания, из которых была удалена часть воды при 70 °С. Также было приготовлено несколько полностью высушенных образцов гелей. Для измерения кинетики набухания полученные образцы погружали в дистиллированную воду, а затем взвешивали через определенное количество времени до достижения постоянной массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После высушивания гидрогели альгината кальция утрачивают свою способность восстанавливать степень набухания при помещении в воду. Максимально достижимая степень набухания гелей альгината кальция создается при гелеобразовании альгината натрия в присутствии хлорида кальция в ходе натрий-кальциевого ионного обмена. При последовательном удалении воды из исходного геля альгината кальция степень поглощения воды при повторном помещении в воду закономерно уменьшается. На рис. 1 представлена зависимость конечной степени набухания альгината кальция от степени набухания, которая получена при частичном высушивании исходных гелей.

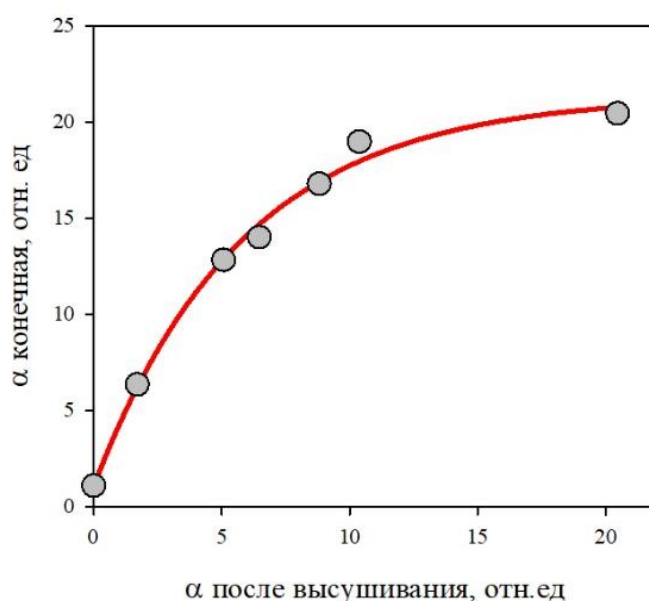


Рис. 1. Зависимость конечной степени набухания от степени набухания после высушивания

Также была определена зависимость разности между степенью набухания после частичного высушивания и конечной достижимой степенью набухания, то есть масса воды, которая поглощается частично высушенным гелем альгината кальция.

На рис. 2 представлены кинетические кривые набухания частично высушенных гелей.

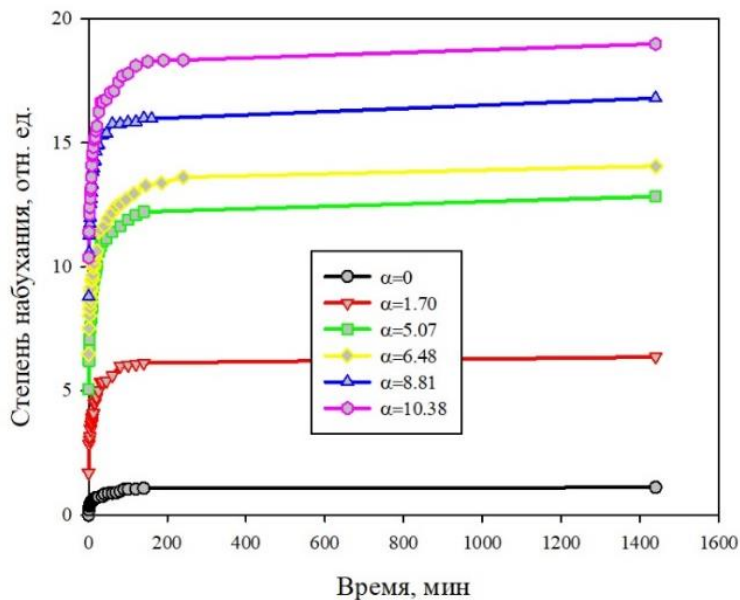
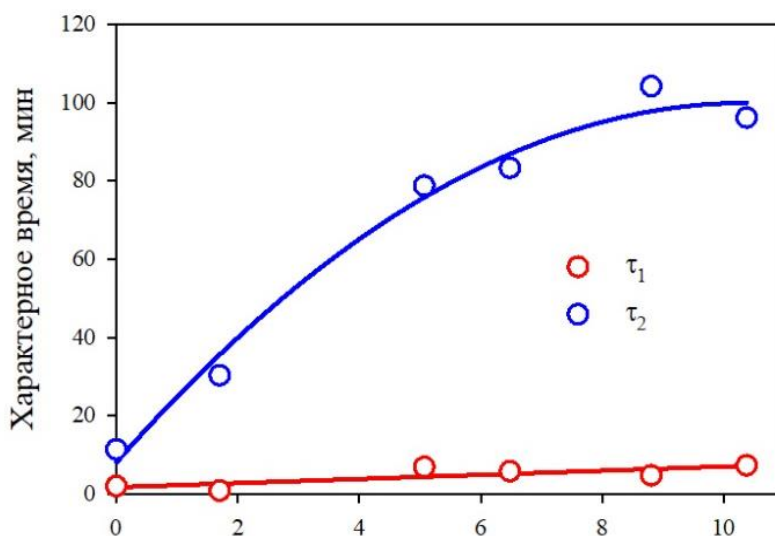


Рис. 2. Зависимость степени набухания от времени

На рис. 3 приведена зависимость характерных времен от степени набухания геля после частичного высушивания.

Видно, что кинетические кривые подобны друг другу. Наибольший рост степени набухания гелей после помещения в воду наблюдается в первые 100–150 минут, а для достижения равновесия требуется около 1 суток.



Степень набухания после частичного высушивания, отн. ед.

Рис. 3. Зависимость характерных времен кинетической кривой набухания от степени набухания геля после частичного высушивания

Из рисунка видно, что характерное время τ_2 гораздо больше характерного времени τ_1 . При этом характерное время τ_1 , в отличие от характерного времени τ_2 , слабо зависит от начальной степени набухания.

ОБСУЖДЕНИЕ

После помещения полностью высушенного геля альгината кальция в воду, в сетку полимера проникает лишь небольшое количество воды. Если же некоторое количество воды остается в образце геля, то после помещения в воду степень набухания гелей восстанавливается в большей степени. Представленная на рис. 1 кривая может быть описана экспоненциальной зависимостью, описываемой уравнением:

$$\alpha = 1,1 + 20,3 \times (1 - \exp(-0,1715\alpha_0)),$$

где α_0 – степень набухания после частичного высушивания; α – конечная достижимая степень набухания в воде.

Количество поглощаемой воды с увеличением степени набухания гелей после высушивания изменяется по кривой с максимумом. Малая величина водопоглощения для гелей альгината кальция, из которых была удалена большая часть воды, может быть объяснена образованием водородных связей между макромолекулами альгината кальция при их сближении в процессе высушивания [1, 3, 5]. Эти межцепные водородные связи впоследствии препятствуют раздвижению цепей сетки геля, необходимому для поглощения воды при повторном помещении в воду.

Полученные кинетические кривые (рис. 2) можно описать двойной экспоненциальной зависимостью, которая представлена функцией:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) + \alpha_2 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right).$$

То есть, поглощение воды гидрогелями альгината кальция является наложением двух процессов с характерными временами τ_1 и τ_2 .

Предположительно, характерное время τ_1 отвечает за гидратацию полярных групп альгината, а τ_2 за процесс разворачивания цепей. Поэтому значительный рост τ_2 с увеличением количества воды, содержащейся в структуре альгината кальция, можно объяснить тем, что увеличивается число цепей сетки вовлекаемых в процесс конформационных изменений при поглощении воды.

ВЫВОДЫ

1. Исследована степень набухания полученных гидрогелей альгината кальция. Установлено, что гели альгината кальция после высушивания утрачивают свою способность восстанавливать равновесную степень набухания при помещении в воду. Степень восстановления набухания значительно увеличивается при уменьшении количества удаленной воды в геле.

2. Показано, что степень набухания значительно растет в первые 100–150 минут после помещения в воду. Кинетические кривые набухания частично высушенных гидрогелей альгината кальция описываются двойной экспоненциальной функцией.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-12-00031.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lee K. Y., Mooney D. J. Alginate: Properties and biomedical applications. *Prog. Polym. Sci.* – 2012; 37(1): 106–126.
2. Alginate-based composite materials for wound dressing application: A mini review / Varaprasad K., Jayaramudu T., Kanikireddy V. et al. // *Carbohydr. Polym.* – 2020; 236: 116025.
3. Draget K. I., Taylor C. Chemical, physical and biological properties of alginates and their biomedical implications. *Food Hydrocolloids.* – 2011; 25(2): 251–256.
4. Rheological evaluation of inter-grade and inter-batch variability of sodium alginate / Fu S., Thacker A., Sperger D. M. et al. // *AAPS PharmSciTech.* – 2010; 11(4): 1662–1674.
5. Donati I., Paoletti S. *Alginates: Biology and Applications. Material Properties of Alginates.* – Heidelberg: Springer Berlin, 2009. – P. 1–53.

Сведения об авторах

Н.М. Курилова – аспирант

А.П. Сафронов – доктор физико-математических наук, профессор

Information about the authors

N.M. Kurilova – postgraduate student

A.P. Safronov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor

УДК: 546.655

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ МАЛЬТОДЕКСТРИНОМ

Наталья Юрьевна Офицерова¹, Ирина Николаевна Бажукова², Александра Владимировна Мышкина³

¹⁻³ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

¹n.ofitserova@mail.ru

Аннотация

Введение. Нанокристаллический диоксид церия проявляет окислительно-восстановительные свойства, обуславливающие его биокаталитическую активность. **Цель исследования** – исследование способностей наночастиц диоксида церия выполнять функции ферментов и неэнзиматических компонентов естественной антиоксидантной системы организма. **Материалы и методы.** Наночастицы диоксида церия, стабилизированные мальтодекстрином,