

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАБУХАНИЯ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА И АКРИЛАТА КАЛИЯ (НАТРИЯ)

Н.В. Маслова, Ж.Ю. Кочетова, П.Т. Суханов, А.В. Змеев

Наталья Владимировна Маслова (ORCID 0000-0002-0100-9600)*, Павел Тихонович Суханов (ORCID 0000-0002-2588-9286)

Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Российская Федерация, 394036

E-mail: maslovanatvl@mail.ru *, pavel.suhanov@mail.ru

Жанна Юрьевна Кочетова (ORCID 0000-0001-8838-9548)

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54 А, Воронеж, Российская Федерация, 394064

E-mail: zk_vva@mail.ru

Александр Владимирович Змеев (ORCID 0000-0001-5900-205X)

Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018

E-mail: zmeev86@mail.ru

Полиэлектrolитные гидрогели нашли широкое применение в медицине, аналитическом контроле, сельском хозяйстве. Гидрогели отличаются способностью абсорбировать и удерживать воду в количествах, в тысячи раз превышающих их собственную массу. При этом изменением рН растворов возможно регулирование сорбционной емкости гидрогелей. Обоснована актуальность исследования свойств полиэлектролитных гидрогелей при различных соотношениях их составных компонентов и рН растворов. Для установления количественного состава исследуемых гидрогелей применена известная модель, основанная на сопоставлении характеристических линий ИК спектров компонентов гидрогелей. Методом термogrавиметрии установлена связь между устойчивостью, степенью набухания и влагоудержанием гидрогелей от мольного содержания в них акрилата натрия (калия). Исследована кинетика набухания гидрогелей в водных растворах при рН от 2 до 12. С увеличением содержания акрилата в составе геля от 8,3 до 18,8 мольн.% при прочих равных условиях возрастает степень его набухания на 15-20%; влагоудержание при 30 °С на 12%, а при 80 °С – на 14%. Получены прямолинейная зависимость степени набухания гидрогелей от рН среды и экспоненциальная зависимость скорости набухания гидрогелей от рН среды ($R^2 \geq 0,98$). Степень набухания исследуемых гидрогелей максимальна в щелочной среде и составляет ~ 123 г/см³ при рН 12,2. Рассчитанные коэффициенты скорости набухания гидрогелей в различные моменты времени показали постоянный во времени характер абсорбции водных растворов в кислой и нейтральной средах. В щелочной среде скорость поглощения раствора гидрогелями неравномерна и имеет выраженный минимум через 2 ч от начала набухания. Выбраны кинетические модели для достоверного описания набухания гидрогелей при различных значениях рН растворов.

Ключевые слова: гидрогели, акриламид, акрилат натрия, акрилат калия, кинетика набухания, рН

Для цитирования:

Маслова Н.В., Кочетова Ж.Ю., Суханов П.Т., Змеев А.В. Исследование кинетики набухания гидрогелей на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (натрия). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 27–34

For citation:

Maslova N.V., Kochetova Zh.Yu., Sukhanov P.T., Zmeev A.V. Investigation of the kinetics of hydrogel swelling based on acrylamide copolymers and potassium (sodium) acrylate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 3. P. 27–34

INVESTIGATION OF THE KINETICS OF HYDROGEL SWELLING BASED ON ACRYLAMIDE COPOLYMERS AND POTASSIUM (SODIUM) ACRYLATE

N.V. Maslova, Zh.Yu. Kochetova, P.T. Sukhanov, A.V. Zmeev

Natalia V. Maslova (ORCID 0000-0002-0100-9600)*, Pavel T. Sukhanov (ORCID 0000-0002-2588-9286)

Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolyutsii Ave., 19, Voronezh, 394036, Russia

E-mail: maslovanatvl@mail.ru *, pavel.suhanov@mail.ru

Zhanna Yu. Kochetova (ORCID 0000-0001-8838-9548)

Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Starykh Bolshevikov st., 54 A, Voronezh, 394064, Russia

E-mail: zk_vva@mail.ru

Alexander V. Zmeev (ORCID 0000-0001-5900-205X)

Voronezh State University, Universitetskaya sqr., 1, Voronezh, 394018, Russia

E-mail: zmeev86@mail.ru

Polyelectrolyte hydrogels are widely used in medicine, analytical control, and agriculture. Hydrogels have the ability to absorb and retain water thousands of times higher than their own mass. At the same time, it is possible to regulate the sorption capacity of hydrogels by changing the pH of solutions. The relevance of the study of the properties of polyelectrolyte hydrogels at different ratios of their constituent components and pH solutions is substantiated. To establish the quantitative composition of the studied hydrogels, a well-known model based on the comparison of the characteristic lines of the IR spectra of the hydrogel components was used. By the method of thermogravimetry, the relationship between the stability, the degree of accumulation and the moisture retention of hydrogels from the molar content of sodium (potassium) acrylate in them was established. The kinetics of swelling of hydrogels in aqueous solutions at pH from 2 to 12 was studied. With an increase in the content of acrylate in the gel composition from 8.3 to 18.8 mol.% all other things being equal, the degree of its swelling will increase by 15-20%; moisture retention at 30 °C by 12%, and at 80 °C – by 14%. The linear dependence of the degree of swelling of hydrogels on the pH of the medium and the exponential dependence of the rate of swelling of hydrogels on the pH of the medium ($R^2 \geq 0.98$) are obtained. The degree of swelling of the studied hydrogels is maximal in an alkaline medium and is $\sim 123 \text{ g/cm}^3$ at a pH of 12.2. The calculated coefficients of the rate of swelling of hydrogels at different time points showed the time-constant nature of the absorption of aqueous solutions in acidic and neutral media. In an alkaline medium, the rate of absorption of the solution by hydrogels is uneven and has a pronounced minimum after 2 h from the beginning of swelling. Kinetic models have been selected to reliably describe the swelling of hydrogels at different pH values of solutions.

Key words: hydrogels, acrylamide, sodium acrylate, potassium acrylate, swelling kinetics, pH

ВВЕДЕНИЕ

Природные и синтетические гидрогели представляют собой полимерные цепи, сшитые друг с другом поперечными ковалентными связями в пространственную сетку. Их называют молекулярными губками, так как они способны накапливать и удерживать огромное количество воды – до нескольких кг на 1 г сухого геля [1, 2]. Благодаря своим уникальным абсорбирующим свойствам, ко-

торые регулируются изменением состава, структуры и плотности сетки, они находят широкое применение в различных сферах, в том числе биомедицине, тканевой инженерии, изготовлении pH-чувствительных датчиков и биосенсоров [2-4], фармацевтической, нефтедобывающей промышленности [5, 6], сельском хозяйстве [7, 8]. При этом наиболее важной характеристикой гидрогелей является их способность поглощения и удерживания воды в различных условиях (pH среды, температура, электрическое поле, свет и др.) [2, 9].

Особо значимы способность полиэлектролитных гидрогелей (ПЭГГ) к поглощению воды, а также возможность их применения для разделения сложных смесей в фармакологии, экологическом и агротехническом контроле [9-11]. ПЭГГ состоят из основного полимера, содержащего слабые кислотные или основные группы, которые становятся более ионизированными в сильно щелочных и сильно кислых средах соответственно [12]. Сильное набухание ПЭГГ в воде обусловлено электростатическим отталкиванием одноименно заряженных звеньев и осмотическим давлением противоионов. При низком содержании заряженных звеньев гидрогель набухает в основном за счет осмотического давления противоионов [13].

Закономерности процесса набухания ПЭГГ, позволяющие прогнозировать эффективность их применения для решения практических задач, изучены недостаточно полно. Есть работы, посвященные исследованию равновесия и фазовых переходов подобных систем, но они не затрагивают важных аспектов влияния кислотности среды на кинетику набухания гидрогелей [14-17]. Вместе с тем, этот фактор может быть определяющим при извлечении тех или иных компонентов из сред различного генезиса [18, 19].

Целью данной работы является исследование влияния pH водных растворов на скорость и степень набухания полиэлектролитных гидрогелей.

Предварительно методом ИК-спектроскопии устанавливали состав ПЭГГ на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (натрия). Они могут быть синтезированы различными способами: непосредственно из акриламида и акрилата; из акриламида и акриловой кислоты с последующей нейтрализацией гидроксидом; путем гидролиза акриламидного геля с гидроксидом; гидролиза полиакрилонитрила с гидроксидом. Во всех случаях необходимо точное определение количества ионного заряда, так как реальное соотношение мономерных звеньев может изменяться в зависимости от их происхождения, что, в свою очередь, оказывает значительное влияние на абсорбционные и удерживающие свойства гидрогелей в различных условиях [8, 20, 21].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовали коммерчески доступные гидрогели: образец I – с диаметром гранул $d = 2-3$ мм на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (Китай, «Агрикола»); образец II – с $d = 1-4$ мм на основе сополимеров акриламида и акрилата натрия (Россия, «Счастливый дачник»).

Набухание гидрогелей проводили в дистиллированной воде, растворах уксусной кислоты и гидроксидов калия (образец I) и натрия (образец II) в дистиллированной воде в интервале pH от 2 до 12. pH и температуру водных растворов (22 ± 2 °C) контролировали pH-метром марки pH-150-МИ с электродом ЭСК-10603/7 и встроенным термокомпенсатором (Россия, ГК «Теплоприбор»).

ИК спектры сухих гранул гидрогелей регистрировали ИК-Фурье-спектрометром «ИнфраЛЮМ® ФТ-08» (Россия, ООО «Льюмекс-маркетинг») в диапазоне длин волн $400-4000$ см⁻¹.

Степень гидролиза полиакриламидного гидрогеля и количество акриламида в гидрогеле рассчитывали по известной методике [22].

Термогравиметрический анализ измельченных до порошка гидрогелей проводили при 30-600 °C в системе синхронного термического анализа «STA 449 F3, Jupiter®» (Германия, NETZSCH) со скоростью сканирования 10 °C/мин и скоростью подачи азота 20 см³/мин.

Для оценки степени набухания (S , г/см³) сухую навеску гидрогеля с массой $m_0 = 1,00 \pm 0,1$ г помещали в мерный цилиндр и добавляли 200 см³ раствора с известным pH. Степень набухания гидрогеля в растворах в каждый момент времени (τ , мин) и после установления равновесия в системе «гидрогель-раствор» рассчитывали по формуле [23]:

$$S = m_0/V_n, \quad (1)$$

где V_n – объем раствора, пошедшего на набухание гидрогеля, см³.

Среднюю скорость набухания гидрогеля (U , мин⁻¹) до момента установления равновесия определяли, как тангенс угла наклона зависимости степени набухания гидрогеля от времени его выдерживания в растворе $S = f(\tau)$. Коэффициент скорости набухания гидрогеля (k_U , мин⁻¹) рассчитывали по формуле [23]:

$$k_U = 1/[\tau \cdot \ln(S_p/(S_p - S_\tau))], \quad (2)$$

где S_p и S_τ – степень набухания гидрогеля при достижении равновесия в системе и в момент времени τ соответственно.

Для изучения механизма водопоглощения и влияния на него pH данные о кинетике набухания исследовали с помощью общепринятых математических кинетических моделей набухания. Кинетические модели набухания псевдо-первого и псевдо-второго порядка описываются выражениями [24, 25]:

$$\ln(S_p - S_\tau) = \ln S_p - k_1 \cdot \tau, \quad (3)$$

$$\tau/S_\tau = 1/k_2 \cdot S_p^2 + \tau/S_p, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – константы скорости моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка.

Модель Ритгера-Пеппаса имеет вид [26]:

$$\ln F = \ln S_{\tau} - \ln S_p = \ln p + n \cdot \ln \tau, \quad (5)$$

где F – скорость дробного набухания в момент времени τ ; p – структурный параметр; n – показатель набухания, который демонстрирует тип диффузии.

Все эксперименты по набуханию гидрогелей проводили не менее трех раз. Для подтверждения результатов использовали непараметрический критерий согласия Пирсона $\chi^2 = 16,9$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k = 9$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры исследуемых сухих гидрогелей на основе сополимеров акриламида и акрилата калия

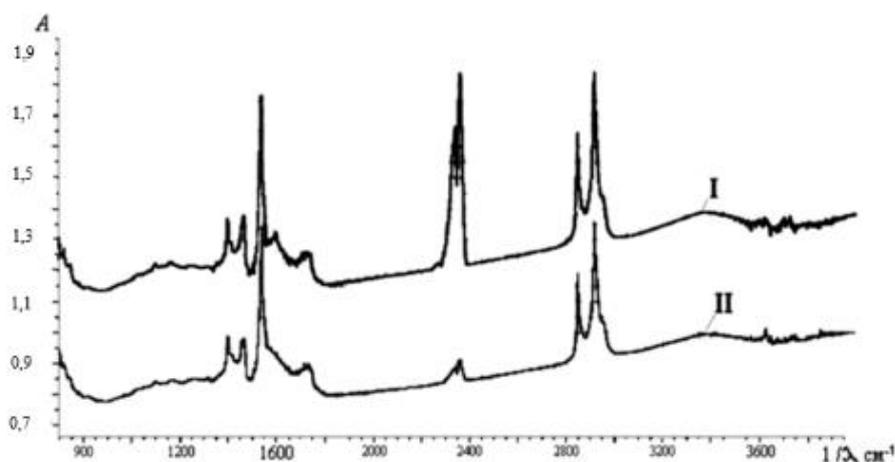


Рис. 1. ИК-спектрограммы сухих гидрогелей на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (I) и натрия (II)
Fig. 1. IR-spectrograms of dry hydrogels based on copolymers of acrylamide and potassium (I) and sodium (II) acrylate

Для установления содержания акрилата (С, % мольн.) в гидрогелях использовали методику [22]. Для этого на полученном ИК-спектре после построения базовых линий определяли величины абсорбции A при $1/\lambda = 1410 \text{ см}^{-1}$ (полоса, отнесенная к COO -группе акрилата) и $1/\lambda = 2931\text{-}2944 \text{ см}^{-1}$ (полоса, отнесенная к CH - и CH_2 -группам акрилата и акриламида). Рассчитанное относительное поглощение $A_{\text{отн}}$ для гидрогелей I и II составило 0,64 и 0,42. В соответствии с моделью [22], взаимосвязь содержания акрилата в гидрогелях с относительным поглощением описывается уравнением:

$$C = -8,83 + 43,2A_{\text{отн}}. \quad (6)$$

Рассчитанные значения содержания акрилата в гидрогелях расходятся с реальными по утверждению авторов модели не более, чем на 10%. Для исследуемых образцов I и II гидрогелей они составили 18,8 и 9,3% мольн. соответственно.

(натрия) представлены на рис. 1. Характеристические полосы для акриламида получены при волновых числах $1/\lambda$: 3410-3421 и 3190-3194 см^{-1} (группы NH_2); 1540-1560 см^{-1} (связь C-N).

Слабые колебания при $1/\lambda = 1640\text{-}1690 \text{ см}^{-1}$ характерны для связей C=O , при 2840-2960 см^{-1} – валентные колебания C-H связей в HC - и CH_2 -группах, присутствующих и в акриламиде, и в акрилате.

Полосы поглощения при 1406-1410 см^{-1} обусловлены присутствием карбоксильной группы акрилата и CN -группы акриламида.

В области 1700-1740 см^{-1} установлен ряд слабых колебаний, характерных для свободных COOH -групп, которые остаются после синтеза гидрогелей.

Из полученных результатов термогравиметрического анализа следует,

что в интервале 30-340 °С протекают эндотермические процессы, максимум которых для исследуемых гидрогелей установлен при 200 (II) и 220 (I) °С, что обусловлено испарением воды и разложением акрилата калия. Появление экзотермического пика с максимумами при 530 (II) и 560 °С (I) свидетельствует о деструкции гелей. Таким образом, гидрогель «Агрикола» характеризуется более высокой термической стабильностью, чем образец «Счастливый дачник».

С повышением температуры способность удерживать дистиллированную воду гидрогеля II снижается быстрее. Так, при температуре 30 °С она составила 86% против 98% для гидрогеля I; при температуре 80 °С – 10% против 24%. При температурах 90 и 105 °С и выше масса гидрогелей II и I соответственно оставалась постоянной.

Степень набухания гидрогелей рассчитывали по уравнению 1. Результаты исследования степени набухания гидрогелей во времени при наиболее характерных значениях pH растворов представлены на рис. 2. Как и предполагалось из результатов ИК-спектрометрического и термического анализов, образец I характеризуется более высокой способностью к поглощению растворов, при этом равновесие в системе с ПЭГГ I наступает на 30-60 мин раньше, чем в системе с ПЭГГ II при соответствующих pH растворов. Максимальное значение $S = 123 \text{ г/см}^3$ получено при pH = 12,2 для гидрогеля I за время установления равновесия равное 120 мин.

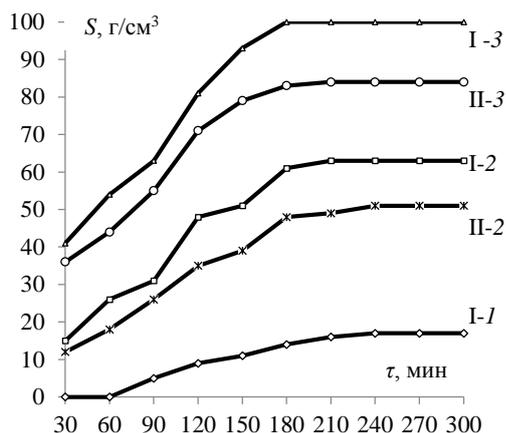


Рис. 2. Кинетика степени набухания гидрогелей I и II в зависимости от pH раствора: 1 – 2,2; 2 – 6,9; 3 – 9,2
 Fig. 2. Kinetics of the degree of swelling of hydrogels I and II depending on the pH of the solution: 1 – 2.2; 2 – 6.9; 3 – 9.2

Для образца I при повышении pH от 2,2 до 12,1 время достижения равновесия снижается от 240 до 150 мин. Средние скорости набухания гидрогелей в зависимости от pH растворов представлены в табл. 1. Образец II с меньшим содержанием акрилата в ~ 2 раза в кислой среде (pH 3) коллапсирует, что объясняется вытеснением натрия из акрилата ионами H^+ хлороводородной кислоты.

Таблица 1

Средние скорости набухания ($мин^{-1}$) гидрогелей с различным содержанием полиакрилата в зависимости от pH раствора

Table 1. Average swelling rates ($мин^{-1}$) of hydrogels with different polyacrylate content depending on the pH of the solution

pH	2,2	4,0	5,6	6,9	9,2	10,1	12,2
ПЭГГ I (18,2% мольн. акрилата K)	0,05	0,11	0,21	0,30	0,48	0,74	1,01
ПЭГГ II (9,3% мольн. акрилата Na)	-	0,09	0,15	0,21	0,46	0,64	0,73

Скорость набухания гидрогелей в исследуемом интервале значений pH возрастает экспоненциально и описывается уравнениями соответственно для образцов I и II:

$$U_I = 0,023e^{0,30pH} (R^2 = 0,98);$$

$$U_{II} = 0,022e^{0,29pH} (R^2 = 0,96).$$

Набухание гидрогелей до установления равновесия в исследуемых системах может протекать неравномерно, что оценивается по коэффициенту скорости этого процесса, рассчитанной в соответствии с уравнением (2) для разных моментов времени. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов скорости набухания гидрогелей от

времени при различных pH для образца I. Для образца II получены идентичные зависимости с незначительно меньшими значениями констант скорости набухания.

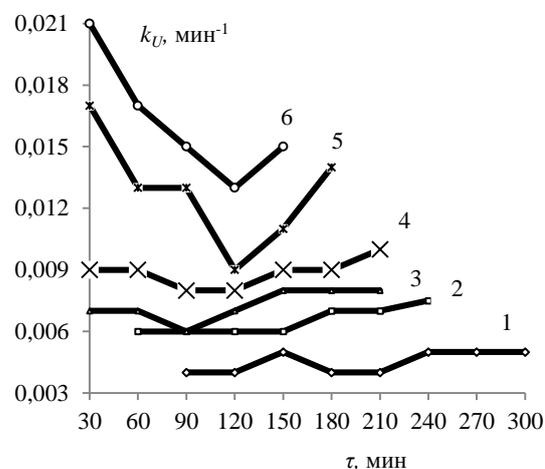


Рис. 3. Динамика коэффициента скорости набухания гидрогеля на основе сополимеров акриламида и акрилата калия в зависимости от pH растворов: 1 – 2,2; 2 – 4,0; 3 – 5,6; 4 – 6,9; 5 – 9,2; 6 – 10,1

Fig. 3. Dynamics of the swelling rate constant of a hydrogel based on copolymers of acrylamide and potassium acrylate depending on the pH of solutions: 1 – 2.2; 2 – 4.0; 3 – 5.6; 4 – 6.9; 5 – 9.2; 6 – 10.1

С повышением pH растворов от 2 до 12 ед. коэффициенты скорости набухания гидрогелей возрастают более, чем в 10 раз. В кислой среде с течением времени k_U минимальны (0,004-0,008 $мин^{-1}$), изменяются разнонаправленно и незначительно до установления равновесия в системе (рис. 3, линии 1-3). В нейтральной среде (рис. 3, линия 4) k_U составляет $0,009 \pm 0,001$, то есть практически не изменяется с течением времени. Незначительный дрейф значения константы скорости набухания при этом обусловлен погрешностью эксперимента. В щелочной среде (рис. 3, линии 5, 6) установлена иная зависимость: в первые 30 мин от начала проведения эксперимента k_U достигает максимального значения $0,021 \text{ мин}^{-1}$, затем процесс плавно замедляется. Точка минимума функции для всех исследуемых щелочных растворов достигается через 120 мин от начала набухания гидрогеля. За 30 мин до установления равновесия в системе «гидрогель-щелочной раствор» k_U увеличивается.

Такое свойство полиэлектролитного гидрогеля с кислотными группами может быть объяснено особенностями ионизации в щелочной среде [23]. Незаряженные гидрогели находятся в сконденсированном состоянии, их набухание вызывает ионизация из-за электростатического отталкивания

ния одноименно заряженных звеньев и «распирающего» осмотического давления противоионов. Гидрогели с преобладанием кислотных групп набухают в щелочной среде, а коллапсируют в кислой, где ионизация подавлена.

Для оценки влияния pH и состава гидрогелей на механизм сорбции воды использовали математические кинетические модели набухания (3-5). Зависимости, описывающие кинетику набухания исследуемых образцов, представлены в табл. 2. Выбор наиболее адекватной модели осуществляли на основе значений R^2 и χ^2 .

Таблица 2

Математические кинетические модели набухания гидрогелей

Table 2. Mathematical kinetic models of hydrogel swelling

pH	2,2	6,9	9,2
Модель псевдо первого порядка $\ln(S_p - S_\tau) = f(\tau)$ (3)			
Образец I	$y = -0,342x + 3,371$ ($R^2 = 0,928$)	$y = -0,573x + 4,809$ ($R^2 = 0,845$)	$y = -0,514x + 4,810$ ($R^2 = 0,899$)
Образец II	-	$y = -0,466x + 4,418$ ($R^2 = 0,862$)	$y = -0,524x + 4,710$ ($R^2 = 0,821$)
Модель псевдо второго порядка $\tau/S_\tau = f(\tau)$ (4)			
Образец I	$y = 2,182x + 1,414$ ($R^2 = 0,435$)	$y = 0,176x + 1,977$ ($R^2 = 0,709$)	$y = 0,197x + 0,667$ ($R^2 = 0,930$)
Образец II	-	$y = 0,221x + 2,609$ ($R^2 = 0,755$)	$y = 0,237x + 0,763$ ($R^2 = 0,931$)
Модель Ритгера-Пеппаса $\ln F = f(\ln \tau)$ (5)			
Образец I	$y = 0,276x - 1,886$ ($R^2 = 0,918$)	$y = 0,270x - 1,530$ ($R^2 = 0,935$)	$y = 0,204x - 1,070$ ($R^2 = 0,988$)
Образец II	-	$y = 0,235x - 1,499$ ($R^2 = 0,926$)	$y = 0,230x - 1,005$ ($R^2 = 0,988$)

Во всех случаях критерий согласия Пирсона χ^2 не превышает 1,5, что гораздо меньше допустимого значения 16,9. Максимальное значение коэффициента детерминации получено при описании кинетики набухания гидрогелей с помощью модели Ритгера-Пеппаса, при этом его значение росло с увеличением pH ($R^2_{\max} = 0,988$). Для кислой и нейтральной сред такой высокий коэффициент детерминации можно получить при раздельной обработке данных для стадий быстрого и медленного поглощения гелями воды. В щелочной среде кинетика набухания образцов также хорошо соответствует модели псевдо-второго порядка ($R^2 = 0,93$). Кинетика набухания образца I при pH = 2,2 лучшим образом описывается моделью псевдо-первого порядка ($R^2 = 0,928$), что подтверждает иной механизм поглощения сильно кислых растворов исследуемыми гидрогелями. Различное содержание акрилата в образцах I и II (18,8 и 9,3% мольн. соответственно) не повлияло на выбор наиболее подходящей кинетической модели для описания их набухания.

ВЫВОДЫ

Исследованы состав и кинетика набухания гидрогелей на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (натрия). Установлено, что содер-

жание акрилата в гидрогеле влияет на его термическую устойчивость, степень и скорость набухания, удержание растворов и чувствительность к pH. При увеличении содержания акрилата в составе гидрогелей с 9,3 до 18,8% мольн. возрастает устойчивость гидрогелей в сильно кислой среде и на 15-20% увеличивается степень их набухания при прочих равных условиях. Максимальная степень набухания (123 г/см³) получена для ПЭГГ с большим содержанием акрилата в сильнощелочной среде. Установлена экспоненциальная зависимость скорости набухания гидрогелей от pH растворов в интервале 2-12 ед. Высокие значения скорости набухания гидрогелей получены в щелочной среде, при этом коэффициент скорости набухания имеет выраженный минимум через 120 мин от начала процесса. Набухание гидрогелей в кислой и нейтральной средах протекает значительно дольше и равномерно. Кинетика набухания гидрогелей во всем интервале pH адекватно описывается моделью Ритгера-Пеппаса; в щелочной среде подчиняется также кинетической модели набухания псевдо второго порядка, а в кислой – псевдо второго порядка. Полученные результаты могут быть применены при разработке методик разделения компонентов водных растворов, при оптимизации использования гидрогелей в сельском хозяйстве.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шахно О.В., Круль Л.П.** Особенности деградации полиэлектролитных гидрогелей на основе функционализированных полиакриламидов при тепловом сгорании. *Докл. НАН Беларуси*. 2016. Т. 60. № 1. С. 54-60.
2. **Bahram M., Mohseni N., Moghtader M.** An Introduction to Hydrogels and Some Recent Applications. 2016. INTECHOPEN. London. P. 2-38. DOI: 10.5772/64301.
3. **Бозо И.Я., Бялялов А.И., Маликеев М.О., Деев Р.В.** Ген-активированные гидрогели в регенеративной медицине. *Гены и клетки*. 2019. Т. 14. № 1. С. 16-21. DOI: 10.23868/201903001.
4. **Pawar S.N., Edgar K.J.** Alginate derivatization: a review of chemistry, properties and applications. *Biomaterials*. 2012. V. 33. N 11. P. 3279-3305. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2012.01.007.
5. **Iutynska G.O., Vortman M.Ya., Abdulina D.R., Kopteva Zh.P., Kopteva A.Ye., Rudenko A.V., Tretyak V.V., Lemeshko V.N.** Biodegradation and antimicrobial activity of guandine-containing polyethylene oxide hydrogel. *Biotechnol. ACTA*. 2020. V. 13. N 4. P. 60-70. DOI: 10.15407/biotech13.04.060.
6. **Сафаров Ф.Э., Гусарова Е.И., Каразеев Д.В., Арсланов И.Р., Телин А.Г., Докичев В.А.** Получение гидрогелей полиакриламида для ограничения водопритоков при разработке нефтегазовых месторождений. *Журн. прикл. химии*. 2018. Т. 91. № 5. С. 755-759.
7. **Neethu T.M., Dubey P., Kaswala A.** Prospects and Applications of Hydrogel Technology in Agriculture. *IJCMAS*. 2018. N 7. P. 3155-3162. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.369.
8. **Рабданов Р.Г.** Абсорбционные свойства сильнонабухающих полимерных гидрогелей, используемых в сельском хозяйстве. *Аграр. Россия*. 2017. № 6. С. 15-18.
9. **Суханов П.Т., Кушнир А.А., Бондарева Л.П.** Влияние набухания полимеров на основе N-винилпирролидона на сорбцию нитрофенолов. *Физикохимия пов-ти и защита материалов*. 2020. Т. 56. № 2. С. 138-141. DOI: 10.31857/S0044185620020266.
10. **Wang Y., Zhu Y., Hu Y., Zeng G., Zhang Y., Zhang Ch., Feng Ch.** How to Construct DNA Hydrogels for Environmental Applications: Advanced Water Treatment and Environmental Analysis. *Small*. 2018. N 14. P. 1703305. DOI: 10.1002/sml.201703305.
11. **Meshkov I.V., Mazhorova N.G., Zhemchugov P.V., Kalinina A.A., Vasilev S.G., Bystrova A.V., Lyubimov S.E., Tereshchenko A.S., Muzafarov A.M.** Iron-containing polymethylsilsesquioxane hydrogels as polymer bases for sorbents of hydrogen sulfide from environment. *INEOS OPEN*. 2019. V. 2. N 4. P. 140-144. DOI: 10.32931/io1920a.
12. **Hendi A., Umair Hassan M., Elsherif M., Alqattan B., Park S., Yetisen A.K., Butt H.** Healthcare Applications of pH-Sensitive Hydrogel-Based Devices: A Review. *Int. J. Nanomedicine*. 2020. N 15. P. 3887-3901. DOI: 10.2147/IJN.S245743.
13. **Bhattacharyya A., O'Bryan Ch., Ni Y., Morley C. D., Taylor C.R., Angelini T.E.** Hydrogel compression and polymer osmotic pressure. *Biotribology*. 2020. V. 22. P. 100125. DOI: 10.1016/j.biotri.2020.100125.

REFERENCES

1. **Shahno O.V., Krul' L.P.** Features of degradation of poly-electrolyte hydrogels based on functionalized polyacrylamides during thermal combustion. *Dokl. NAN Belarusi*. 2016. V. 60. N 1. P. 54-60 (in Russian).
2. **Bahram M., Mohseni N., Moghtader M.** An Introduction to Hydrogels and Some Recent Applications. 2016. INTECHOPEN. London. P. 2-38. DOI: 10.5772/64301.
3. **Bozo I.Ya., Bilyalov A.I., Malikeev M.O., Deev R.V.** Gene-activated hydrogels in regenerative medicine. *Geny Kletki*. 2019. V. 14. N 1. P. 16-21 (in Russian). DOI: 10.23868/201903001.
4. **Pawar S.N., Edgar K.J.** Alginate derivatization: a review of chemistry, properties and applications. *Biomaterials*. 2012. V. 33. N 11. P. 3279-3305. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2012.01.007.
5. **Iutynska G.O., Vortman M.Ya., Abdulina D.R., Kopteva Zh.P., Kopteva A.Ye., Rudenko A.V., Tretyak V.V., Lemeshko V.N.** Biodegradation and antimicrobial activity of guandine-containing polyethylene oxide hydrogel. *Biotechnol. ACTA*. 2020. V. 13. N 4. P. 60-70. DOI: 10.15407/biotech13.04.060.
6. **Safarov F.E., Gusarova E.I., Karazeev D.V., Arslanov I.R., Telin A.G., Dokichev V.A.** Production of polyacrylamide hydrogels for limiting water flows during the development of oil and gas fields. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2018. V. 91. N 5. P. 755-759 (in Russian).
7. **Neethu T.M., Dubey P., Kaswala A.** Prospects and Applications of Hydrogel Technology in Agriculture. *IJCMAS*. 2018. N 7. P. 3155-3162. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.369.
8. **Rabadanov R.G.** Absorption properties of Highly Swelling Polymer Hydrogels Used in agriculture. *Agrar. Rossiya*. 2017. N 6. P. 15-18 (in Russian).
9. **Sukhanov P.T., Kushnir A.A., Bondareva L.P.** Effect of swelling of polymers based on N-vinylpyrrolidone on the sorption of nitrophenols. *Fizikohim. Pov-ti i Zashchita Mater.* 2020. V. 56. N 2. P. 138-141 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044185620020266.
10. **Wang Y., Zhu Y., Hu Y., Zeng G., Zhang Y., Zhang Ch., Feng Ch.** How to Construct DNA Hydrogels for Environmental Applications: Advanced Water Treatment and Environmental Analysis. *Small*. 2018. N 14. P. 1703305. DOI: 10.1002/sml.201703305.
11. **Meshkov I.V., Mazhorova N.G., Zhemchugov P.V., Kalinina A.A., Vasilev S.G., Bystrova A.V., Lyubimov S.E., Tereshchenko A.S., Muzafarov A.M.** Iron-containing polymethylsilsesquioxane hydrogels as polymer bases for sorbents of hydrogen sulfide from environment. *INEOS OPEN*. 2019. V. 2. N 4. P. 140-144. DOI: 10.32931/io1920a.
12. **Hendi A., Umair Hassan M., Elsherif M., Alqattan B., Park S., Yetisen A.K., Butt H.** Healthcare Applications of pH-Sensitive Hydrogel-Based Devices: A Review. *Int. J. Nanomedicine*. 2020. N 15. P. 3887-3901. DOI: 10.2147/IJN.S245743.
13. **Bhattacharyya A., O'Bryan Ch., Ni Y., Morley C. D., Taylor C.R., Angelini T.E.** Hydrogel compression and polymer osmotic pressure. *Biotribology*. 2020. V. 22. P. 100125. DOI: 10.1016/j.biotri.2020.100125.

14. **Lanthong P., Nuisin R., Kiatkamjornwong S.** Graft copolymerization, characterization, and degradation of cassava starch-g-acrylamide/itaconic acid superabsorbents. *Carbohydr. Polym.* 2006. N 66. P. 229-245. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.03.006.
15. **Vallés E., Durando D., Katime I., Mendizabal E., Puig J.** Equilibrium swelling and mechanical properties of hydrogels. *Polymer Bull.* 2000. N 44. P. 109-114. DOI: 10.1007/s002890050580.
16. **Dan S., Banivaheb S., Hashemipour H., Kalantari M.** Synthesis, characterization and absorption study of chitosan-g-poly(acrylamide-co-itaconic acid) hydrogel. *Polym. Bull.* 2021. N 78. DOI: 10.1007/s00289-020-03190-8.
17. **Czarnecka E., Nowaczyk J.** Semi-Natural Superabsorbents Based on Starch-g-poly(acrylic acid): Modification, Synthesis and Application. *Polymers.* 2020. N 12. P. 1794. DOI: 10.3390/polym12081794.
18. **Щербакoвa Я.И., Ефимов Н.Н., Михайлова А.В., Саввин С.Б., Минин В.В.** Особенности комплексообразования переходных металлов с гидрогелями. *Журн. неорг. химии.* 2013. Т. 58. № 7. С. 936-939. DOI: 10.7868/S0044457X13070210.
19. **Мокшина Н.Я., Пахомова О.А., Шаталов Г.В., Косинова И.И.** Межфазное распределение некоторых аминокислот в экстракционных системах на основе сополимеров N-винилформамида. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 1. С. 4-10. DOI: 10/6060/ivkkt.20196201.5763.
20. **Magalhães A.S., Neto M., Bezerra M., Ricardo N., Feitosa J.** Application of ftir in the determination of acrylate content in poly (sodium acrylate-CO-acrylamide) superabsorbent hydrogels. *Quim. Nova.* 2011. N 35. P. 1464-1467. DOI: 10.1590/S0100-40422012000700030.
21. **Ismail H., Irani M., Ahmad Z.** Starch-Based Hydrogels: Present Status and Applications. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* 2013. N 62. P. 411-420. DOI: 10.1080/00914037.2012.719141.
22. **Magalhães A.S.G., Neto M.P.A., Bezerra M.N., Ricardo N.M.P.S., Feitosa J.P.A.** Application of ftir in the determination of acrylate content in poly(sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogels. *Quim. Nova.* 2012. V. 35. N 7. P. 1464-1467. DOI: 10.1590/S0100-40422012000700030.
23. **Семчиков Ю.Д., Жильцов С.Ф., Зайцев С.Д.** Введение в химию полимеров. СПб.: Лань. 2014. 222 с.
24. **Lagergren S.** Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. *Handlingar: Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens.* 2001. V. 24. N 4. P. 1-39.
25. **Ho Y., McKay G.** Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem.* 1999. V. 34. P. 451-465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
26. **Peppas N.A., Khare A.R.** Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release. *Adv. Drug. Deliv. Rev.* 1993. V. 11. N 1-2. P. 1-35. DOI: 10.1016/0169-409X(93)90025-Y.
14. **Lanthong P., Nuisin R., Kiatkamjornwong S.** Graft copolymerization, characterization, and degradation of cassava starch-g-acrylamide/itaconic acid superabsorbents. *Carbohydr. Polym.* 2006. N 66. P. 229-245. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.03.006.
15. **Vallés E., Durando D., Katime I., Mendizabal E., Puig J.** Equilibrium swelling and mechanical properties of hydrogels. *Polymer Bull.* 2000. N 44. P. 109-114. DOI: 10.1007/s002890050580.
16. **Dan S., Banivaheb S., Hashemipour H., Kalantari M.** Synthesis, characterization and absorption study of chitosan-g-poly(acrylamide-co-itaconic acid) hydrogel. *Polym. Bull.* 2021. N 78. DOI: 10.1007/s00289-020-03190-8.
17. **Czarnecka E., Nowaczyk J.** Semi-Natural Superabsorbents Based on Starch-g-poly(acrylic acid): Modification, Synthesis and Application. *Polymers.* 2020. N 12. P. 1794. DOI: 10.3390/polym12081794.
18. **Shcherbakova Ya.I., Efimov N.N., Mikhaylova A.V., Savvin S.B., Minin V.V.** Features of complex formation of transition metals with hydrogels. *Zhurn. Neorg. Khim.* 2013. V. 58. N 7. P. 936-939 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044457X13070210.
19. **Mokshina N.Ya., Pakhomova O.A., Shatalov G.V., Kosinova I.I.** Interphase distribution of some amino acids in extraction systems based on N-vinyl formamide copolymers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 1. P. 4-10. DOI: 10/6060/ivkkt.20196201.5763.
20. **Magalhães A.S., Neto M., Bezerra M., Ricardo N., Feitosa J.** Application of ftir in the determination of acrylate content in poly (sodium acrylate-CO-acrylamide) superabsorbent hydrogels. *Quim. Nova.* 2011. N 35. P. 1464-1467. DOI: 10.1590/S0100-40422012000700030.
21. **Ismail H., Irani M., Ahmad Z.** Starch-Based Hydrogels: Present Status and Applications. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* 2013. N 62. P. 411-420. DOI: 10.1080/00914037.2012.719141.
22. **Magalhães A.S.G., Neto M.P.A., Bezerra M.N., Ricardo N.M.P.S., Feitosa J.P.A.** Application of ftir in the determination of acrylate content in poly(sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogels. *Quim. Nova.* 2012. V. 35. N 7. P. 1464-1467. DOI: 10.1590/S0100-40422012000700030.
23. **Semchikov Yu.D., Zhil'cov S.F., Zajcev S.D.** Introduction to polymer chemistry. SPb.: Lan'. 2014. 222 p. (in Russian).
24. **Lagergren S.** Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. *Handlingar: Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens.* 2001. V. 24. N 4. P. 1-39.
25. **Ho Y., McKay G.** Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem.* 1999. V. 34. P. 451-465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
26. **Peppas N.A., Khare A.R.** Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release. *Adv. Drug. Deliv. Rev.* 1993. V. 11. N 1-2. P. 1-35. DOI: 10.1016/0169-409X(93)90025-Y.

Поступила в редакцию 23.08.2021
Принята к опубликованию 21.12.2021

Received 23.08.2021
Accepted 21.12.2021