

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 664.282

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОЗАМЕЩЕННЫХ
ПОПЕРЕЧНОСШИТЫХ ЭПИХЛОРГИДРИНОМ КАТИОННЫХ
КРАХМАЛОВ РАЗЛИЧНОГО БОТАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ****Сергей Михайлович Бутрим¹, Татьяна Дмитриевна Бильдюкевич¹,
Наталья Степановна Бутрим¹, Владимир Владимирович Литвяк²**¹ Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»² Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха»**Автор, ответственный за переписку:** Владимир Владимирович Литвяк,
besserk1974@mail.ru

Аннотация. Разработан метод одностадийной катионизации и поперечной сшивки картофельного и кукурузного крахмалов с использованием в качестве сшивающего агента эпихлоргидрина. Синтезированы образцы поперечносшитого катионного картофельного и кукурузного крахмалов с регулируемыми вязкостными свойствами, водные дисперсии которых при разных значениях температуры и степени сшивки проявляют псевдопластичные свойства. Установлено, что полученные сшитые катионные крахмалы сохраняют гранулярную структуру, а степень кристалличности образцов независимо от температуры (20–45 °С), времени реакции (24–96 ч) и дозы сшивающего агента (0,05–5,00%) снижается очень незначительно. Показано, что скорость флокуляции каолиновых суспензий возрастает при увеличении дозы флокулянта для всех видов катионных крахмалов. Показано, что независимо от дозы максимальная скорость седиментации каолина в модельных системах наблюдается при использовании сшитого катионного картофельного крахмала. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологии получения биodeградируемых сшитых катионных крахмалов в качестве эффективных флокулянтов для очистки водных растворов как альтернатива синтетическим производным полиакриламида.

Ключевые слова: крахмал, катионизация, поперечное сшивание, эпихлоргидрин, вязкость, флокуляция

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-2-174-184

Для цитирования: Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Литвяк В.В. Получение и изучение свойств высокозамещенных поперечносшитых эпихлоргидрином катионных крахмалов различного ботанического происхождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 2. С. 174–184.

ORIGINAL ARTICLE

**OBTAINING AND STUDYING THE PROPERTIES OF HIGHLY
SUBSTITUTED CATIONIC STARCHES OF DIFFERENT BOTANICAL
ORIGINS**

**Sergey M. Butrim¹, Tatiana D. Bil'dyukevich¹, Natalia S. Butrim¹,
Vladimir V. Litvyak²**

¹ Belarusian State University, Research Institute for Physical Chemical Problems

² All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials
Processing – Branch of Russian Potato Research Centre

Corresponding author: Vladimir V. Litvyak, besserk1974@mail.ru

Abstract. Regularities have been investigated and a method has been developed for one-stage cationization and cross-linking of potato and corn starches using epichlorohydrin as a cross-linking agent. Samples of cross-linked cationic potato and corn starches with controlled viscosity properties, the aqueous dispersions of which exhibit pseudoplastic properties at various temperatures and degrees of cross-linking, have been synthesized. It was found that the obtained crosslinked cationic starches retain their granular structure, and the degree of crystallinity of the samples, regardless of the temperature (20–45 °C), reaction time (24–96 h), and the dose of the crosslinking agent (0,05–5,0%), is greatly reduced. insignificantly. It was found that the rate of flocculation of kaolin suspensions increases with an increase in the dose of flocculant for all types of cationic starches. It has been shown that, regardless of the dose, the maximum sedimentation rates of kaolin in model systems are observed when using cross-linked cationic potato starch. The results obtained can be used to develop a technology for producing biodegradable crosslinked cationic starches with the aim of their further use in polymer flooding to increase oil recovery, and also as effective flocculants for cleaning aqueous solutions as an alternative to synthetic polyacrylamide derivatives.

Keywords: starch, cationization, cross-linking, epichlorohydrin, viscosity, flocculation

For citation: Butrim S.M., Bil'dyukevich T.D., Butrim N.S., Litvyak V.V. Obtaining and Studying the Properties of Highly Substituted Cationic Starches of Different Botanical Origins // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. 2025. T. 66. № 2. S. 174–184.

Катионные полисахариды – важные коммерческие продукты (HI-CAT[®], Roquette, Франция, AmylofaxTM, Avebe, Нидерланды), которые находят широкое применение в различных областях промышленности (производство бумаги и картона, нефтедобыча и флотация руды, обезвоживание шламов и осадков, водоподготовка [1–5]). Большинство широко используемых флокулянтов – производные полиакриламида, чем обусловлены их хорошая растворимость в воде, высокая молекулярная масса и способность образовывать нейтральные, а также катионные и анионные структуры в результате полимераналогичных превращений или сополимеризации соответствующих мономеров [6, 7]. Однако синтетические флокулянты в основном не биodeградируемы и могут обладать высокой токсичностью, что в значительной степени стимулирует поиск новых флокулянтов на основе возобновляемого сырья.

Исследования ученых направлены в настоящее время на получение биodeградируемых флокулянтов на основе привитых производных полиакриламида и полисахаридов [8, 9], а также модифицированных полисахаридов, содержащих различные функциональные группы [10–12].

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы получить и исследовать свойства высокозамещенных поперечносшитых эпихлоргидрином катионных крахмалов различного ботанического происхождения.

Объект и методы исследования

Объект исследований. Объектом исследования являются поперечносшитые катионные картофельные и кукурузные крахмалы.

Физико-химические методы исследований. Запись дифракционных кривых проводили на рентгеновском дифрактометре HZG-4A (Carl

Zeiss Jena), CuK_α -излучение, Ni-фильтр, поточечная запись. Препарирование образцов осуществляли методом холодного прессования полимера в виде монолитных круглых таблеток толщиной 2 мм и диаметром 18 мм. Относительную степень кристалличности рассчитывали по отношению интенсивностей I_k/I_o , где I_k – интенсивность дифракции рентгеновских лучей на кристаллических областях; I_o – общая интенсивность дифракции рентгеновских лучей.

Морфологию структурных элементов, составляющих частицы нативного крахмала и приготовленных образцов модифицированного крахмала, изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 (Германия) [13–15]. При изготовлении препаратов образцы крахмала в виде порошка наносили на металлическую подложку и прикрепляли к ее поверхности посредством токопроводящего клея. Затем на крахмал напыляли слой золота. Напыление проводили в вакуумной установке EMITECH K 550X (Германия).

Для получения ИК-спектров использовали ИК-Фурье спектрометр Nicolet iS10 (США). Параметры регистрации ИК-спектров: спектральная область 4000–400 см^{-1} ; разрешение 4,0 см^{-1} ; число накоплений 16 [16–19].

Исследования по оценке флокулирующей активности сшитых катионных крахмалов проводили при $T = 10\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ и pH 3,0–10,5 в стеклянных цилиндрах объемом 550 мл. Каолин суспендировали в дистиллированной воде, перемешивая на магнитной мешалке в течение 15 мин со скоростью 300 об/мин. Флокулянты в виде свежеприготовленных 0,2%-х водных растворов добавляли к полученной 0,1%-й суспензии каолина, создавая концентрацию 2,5 мг/г_{каолина}, затем перемешивали на магнитной мешалке в течение 5 мин со скоростью 300 об/мин и еще 2 мин при 180 об/мин. После выдержки в течение необходимого времени отбирали аликвоту (2,5 мл) на половине высоты слоя суспензии и измеряли оптическую плотность при $\lambda = 500 \pm 1$ нм на UV/VIS-спектрофотометре SP8001 (Metertech, Тайвань). Эффективность флокуляции (EF) каолиновых суспензий рассчитывали по формуле:

$$EF = \left(1 - \frac{D_t}{D_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

где D_t – оптическая плотность при $\lambda = 500 \pm 1$ нм после выдержки суспензии в течение времени t ; D_0 – оптическая плотность суспензии при $\lambda =$

500 ± 1 нм в начале теста. Относительная погрешность измерения оптической плотности 0,2%.

Измерение динамической вязкости (η) 1%-х водных коллоидных дисперсий модифицированных крахмалов проводили на вискозиметре Брукфильда Brookfield LV DV-II+Pro (США) в термостатируемой ячейке для малых количеств образца SC4-13R(P) при температуре, равной 20, 50, 80 $^\circ\text{C}$, и разных значениях скорости сдвига (γ , с^{-1}) [20, 21]. Относительная погрешность измерения динамической вязкости 0,5%.

Водопоглощение и растворимость сшитых катионных крахмалов определяли по методу Leach, McCowen и Schoch [22] с некоторыми модификациями. Водные дисперсии крахмала с концентрацией 2,0% помещали при комнатной температуре в центрифужные пробирки и закрывали сверху крышкой. После выдержки в течение 30 мин образцы центрифугировали (15 мин, 3000 об/мин). Осажденную пасту крахмала отделяли от надосадочной жидкости и взвешивали (W_p). Осадок и надосадочная жидкость были высушены при 105 $^\circ\text{C}$ в течение 24 ч, после чего были определены масса сухого вещества в осажженной пасте (W_{ps}) и в надосадочной жидкости (W_s). Водопоглощение образца (ВП, г/г) рассчитывали по формуле:

$$\text{ВП} = \frac{W_p}{W_{ps}}, \quad (2)$$

Растворимость (P , %) сшитых катионных крахмалов была рассчитана по формуле:

$$P = \frac{W_s}{W_o} \times 100, \quad (3)$$

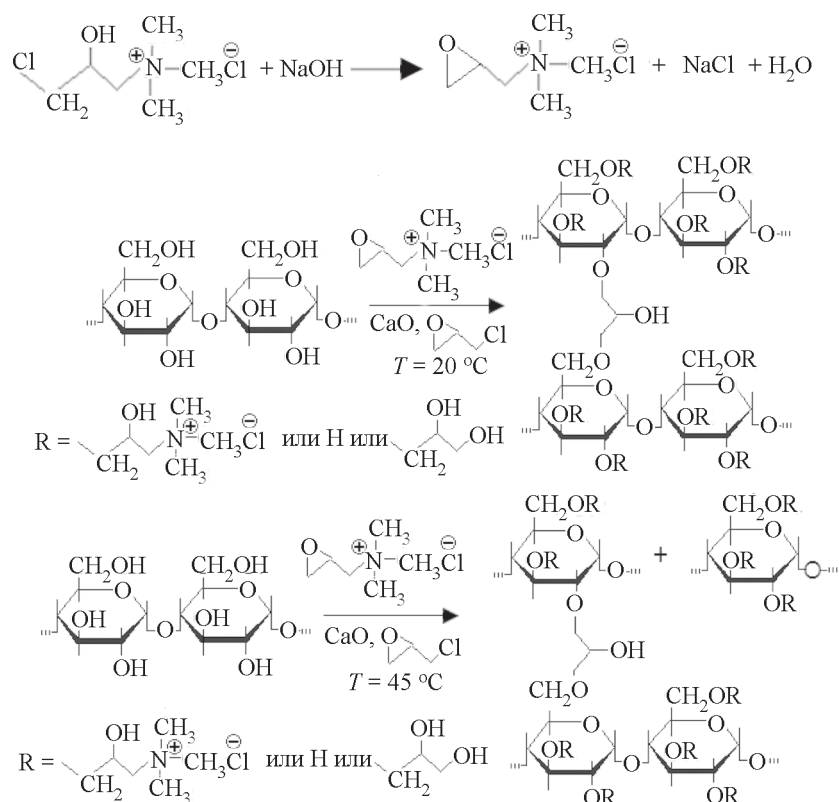
где W_s – масса сухого вещества в надосадочной жидкости, г; W_o – масса сухого образца исходного сшитого катионного крахмала, г. Относительная погрешность измерений водопоглощения и растворимости сшитых катионных крахмалов составляет 0,05%.

Содержание азота (N, %) в образцах определяли методом Кьельдаля, по увеличению содержания азота после катионизации рассчитывали степень замещения ($\text{CЗ}_{\text{кат.}}$):

$$\text{CЗ}_{\text{кат.}} = \frac{N_{\text{кат.}} \times 162,1}{1401 - N_{\text{кат.}} \times 151,6},$$

где $N_{\text{кат.}} = N - N_{\text{исх.}}$, $N_{\text{кат.}}$ – содержание азота, введенное в крахмал с катионными группами, %; N – содержание азота в катионном крахмале, %; $N_{\text{исх.}}$ – содержание азота в нативном крахмале, %.

С х е м а



Относительная погрешность измерения содержания азота составляет 0,5%.

Результаты и их обсуждение

В основе метода синтеза поперечносшитых катионных крахмалов лежит наш способ [23, 24] с внесением в него изменений по мольному соотношению исходных компонентов и одновременным введением в смесь сшивающего агента – эпихлоргидрина (ЭХГ), что позволило получить диспергируемые в холодной воде сшитые катионные крахмалы (схема).

Как видно из гистограмм, приведенных на рис. 1, эффективность катионизации крахмала в присутствии различных доз сшивающего агента (ЭХГ) в значительной степени зависит от ботанического происхождения крахмала, температуры реакции и дозы ЭХГ, что связано с различиями в надмолекулярной структуре и морфологии гранул картофельного и кукурузного крахмалов, а также с различиями в скорости основных (катионизация и сшивка крахмала) и побочных (взаимодействие между собой 2,3-эпоксипропилтриметиламмоний хлорида, щелочи и ЭХГ) реакций при разных значениях температуры.

Как видно из гистограмм, при прочих равных условиях наибольшие скорость и степень

катионизации при одновременной сшивке ЭХГ характерны для картофельного крахмала при температуре 45 °C, а наименьшие – для кукурузного крахмала при $T = 20$ °C. Так, например, для картофельного крахмала максимальная эффективность катионизации достигает 91,7%, а для кукурузного крахмала – 74,5%. Этот способ катионизации крахмала позволяет сохранять его гранулярную структуру и при достижении определенной степени замещения ($CZ_{кат.} > 0,1$) получать катионные крахмалы, которые образуют прозрачные коллоидные дисперсии в холодной воде, в отличие от традиционно используемых в качестве проклеивающих средств в бумажной промышленности катионных крахмалов с низкой степенью замещения ($CZ_{кат.} = 0,02–0,05$), растворимых только в горячей воде. Как видно из рис. 1, при проведении реакции для картофельного крахмала максимальное содержание катионных групп достигается уже на 2–3-е сутки при комнатной температуре (20 °C) и на 1–3-е сутки при $T = 45$ °C в зависимости от дозы сшивающего агента. Исключение составляет лишь образец катионного сшитого картофельного крахмала, полученный при максимальной дозе ЭХГ (5,0%) и $T = 45$ °C. Для него максимальная степень замещения по катионным группам достигается через двое суток реакции.

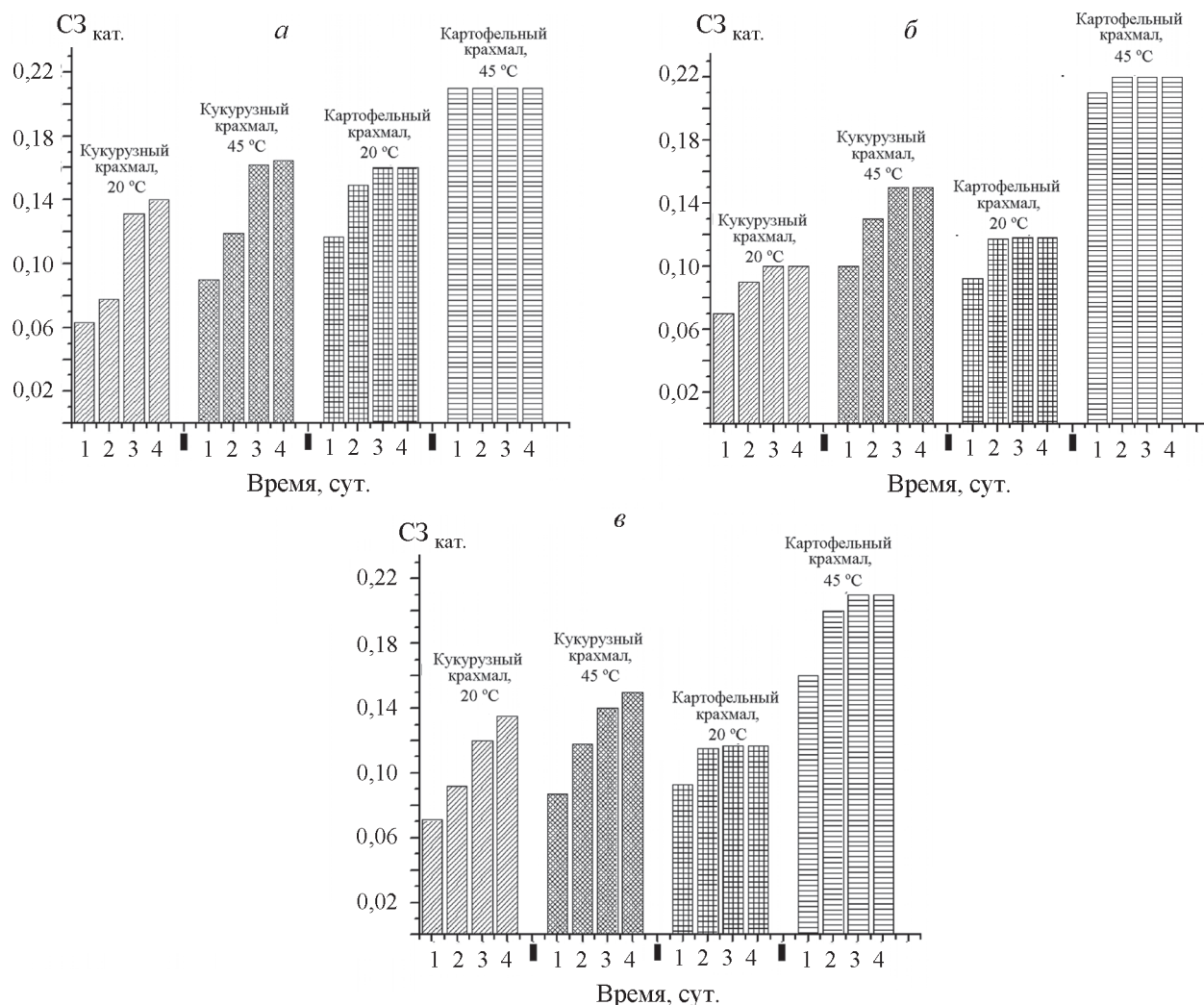


Рис. 1. Гистограмма катионизации полусухим способом различных видов крахмала в зависимости от времени реакции в присутствии различных доз ЭХГ, %: *a* – 0,25 ЭХГ, *б* – 1,0%, *в* – 5,0 (мольное соотношение компонентов в системе крахмал: ХГПТМАХ : [CaO + NaOH] : H₂O = 1 : 0,24 : 0,48 : 2,8)

Катионизация крахмалов до более высокой степени сшивки требует увеличения расхода ЭХГ (рис. 1, *б*, *в*), при этом в системе возрастает и количество воды, внесенной с растворами ХГПТМАХ и NaOH. Как следствие, скорость диффузии реагентов в таких смесях увеличивается, что снижает общее время (до 2 сут. для картофельного, до 3 сут. для кукурузного крахмалов при $T = 45\text{ °C}$), необходимое для достижения максимальной степени катионизации изученных нативных крахмалов. При этом в присутствии большего количества воды интенсифицируется побочная реакция гидролиза ХГПТМАХ с образованием 2,3-гидроксипропилтриметиламмоний хлорида, который не реагирует с крахмалом. Это в свою очередь приводит к снижению эффективности катионизации крахмалов в таких смесях. Как видно из приведенных гистограмм, увеличение количества ЭХГ в значительной степени снижает

скорость и степень катионизации при комнатной температуре. Вероятно, при низких значениях температуры превалирует протекание побочных реакций, прежде всего, взаимодействия ЭХГ и катионного реагента, что не позволяет достичь требуемой степени катионизации крахмала.

Нужно отметить, что предварительные исследования по катионизации и сшивке в присутствии триметафосфата натрия не показали такого значимого влияния дозы сшивающего агента на степень катионизации независимо от температурных условий. Даже в присутствии сравнительно больших доз триметафосфата натрия картофельный и кукурузный крахмалы катионировались с высокой эффективностью. В то же время, как видно из рис. 1, высокая степень катионизации крахмала сохраняется только при высокой температуре и при использовании в качестве исходного объекта картофельного крахмала.

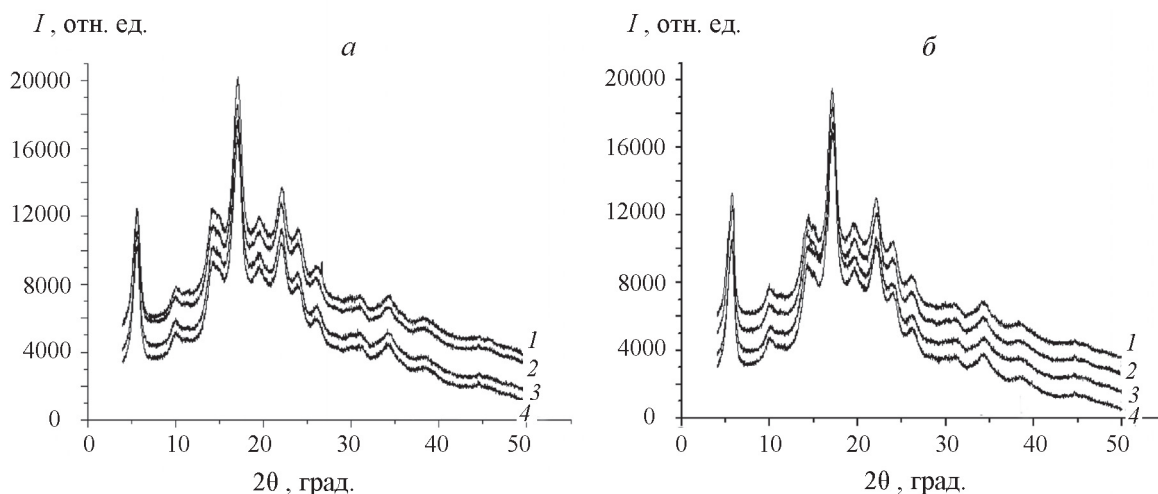


Рис. 2. Дифрактограммы сшитых эпихлоргидрином катионных картофельных крахмалов при T , °C:
 а – 20, б – 45 (1,0% ЭХГ; мольное соотношение компонентов в системе
 крахмал : ХГПТМАХ : $[\text{CaO} + \text{NaOH}] : \text{H}_2\text{O} = 1 : 0,24 : 0,48 : 2,8$);
 время, сут.: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Образование катионных эфиров крахмала подтверждено результатами элементного и ИК-спектроскопического анализов. В ИК-Фурье спектрах сшитого ЭХГ катионного картофельного и кукурузного крахмалов наблюдается появление полосы валентных колебаний связи $\nu(\text{C}-\text{N})$ при 1475 см^{-1} , интенсивность которой возрастает при увеличении содержания катионного азота.

При проведении катионизации и поперечной сшивки крахмала 3-хлоро-2-гидроксипропилтриметиламмоний хлоридом в щелочной среде могут происходить изменения надмолекулярной структуры и морфологии гранул, прежде всего, в зависимости от температурного режима процесса и типа используемого крахмала. Однако дифрактограммы, представленные на рис. 2 свидетельствуют о несущественном уменьшении степени кристалличности для картофельного крахмала после его катионизации при разных значениях температуры. Видно, что основные рефлексы, характерные для картофельного крахмала (2θ составляет 14,1, 17,0, 19,5 и 22,1 град.) отчетливо выражены во всех образцах их сшитых катионных производных даже после 4 сут. реакции и при проведении катионизации как при комнатной (20 °C), так и повышенной (45 °C) температуре.

Из дифрактограмм видно, что несколько уменьшается пиковая интенсивность дифракционных максимумов, при этом их положение и ширина не меняются, что может свидетельствовать об общем незначительном уменьшении доли

кристаллитов в сшитом ЭХГ катионном крахмале при сохранении параметров кристаллической ячейки и размеров самих кристаллитов.

Следует отметить, что, несмотря на незначительную аморфизацию после катионизации, все сшитые катионные крахмалы, имеющие $\text{CZ}_{\text{кат.}} > 0,1$ легко диспергируются в холодной воде с образованием однородных вязких клейстеров. Такое поведение сшитых ЭХГ высокозамещенных катионных крахмалов в воде связано с несколькими факторами: высокая гидрофильность и большой объем введенных четвертичных аммониевых групп, способствующий разрушению межмолекулярных водородных связей, несмотря на увеличение молекулярной массы полисахарида в ходе одновременной катионизации и сшивки. Одновременная сшивка и катионизация как картофельного, так и кукурузного крахмалов сопровождается сохранением их гранулярной структуры.

Результаты исследований кинетики и эффективности флокуляции модельных каолиновых суспензий синтезированными сшитыми катионными крахмалами разного ботанического происхождения в зависимости от температуры и pH представлены на рис. 3, 4. Введение в систему сшитого катионного крахмала приводит к быстрой дестабилизации каолиновых дисперсий (рис. 3), при этом для всех катионных крахмалов с увеличением температуры в интервале 10–50 °C скорость флокуляции частиц дисперсий каолина возрастает. Следует отметить, что наиболее эффективно и с наибольшей скоростью

происходит флокуляция дисперсий каолина в присутствии сшитого ЭХГ катионного картофельного крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,21$) (рис. 3). Исследованные модифицированные крахмалы имеют близкие значения степени замещения по катионным группам, при этом достаточно большая протяженность области флокуляции наблюдается только у сшитого катионного картофельного крахмала 0,5–7,5 мг/г_{каолин}, а сшитый катионный кукурузный крахмал проявляет хорошие флокулирующие свойства в значительно бо-

лее узком интервале доз: 1,0–2,5 мг/г_{каолин}. Объяснить такой характер поведения флокулянтов на основе исследуемых катионных крахмалов, учитывая, что определяющими факторами в их эффективности по дестабилизации каолиновых дисперсий являются плотность катионного заряда, а также молекулярная масса и степень разветвления полисахаридных цепей, достаточно сложно. Таким образом, эффективность флокуляции минеральных систем может определяться не только молекулярной массой полимера, но и

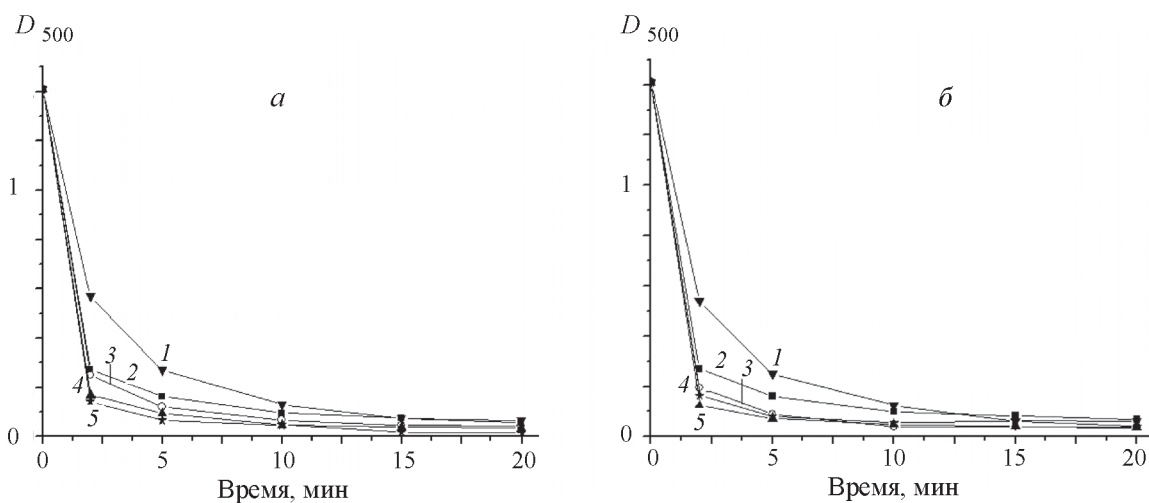


Рис. 3. Кинетические зависимости оптической плотности 0,1%-х каолиновых суспензий при pH 6,0 в присутствии сшитого катионного кукурузного (а) крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,16$; 1,0% ЭХГ) и сшитого катионного картофельного (б) крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,21$; 1,0% ЭХГ) в дозе 2,5 мг/г_{каолин} при разных значениях температуры, °С: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50

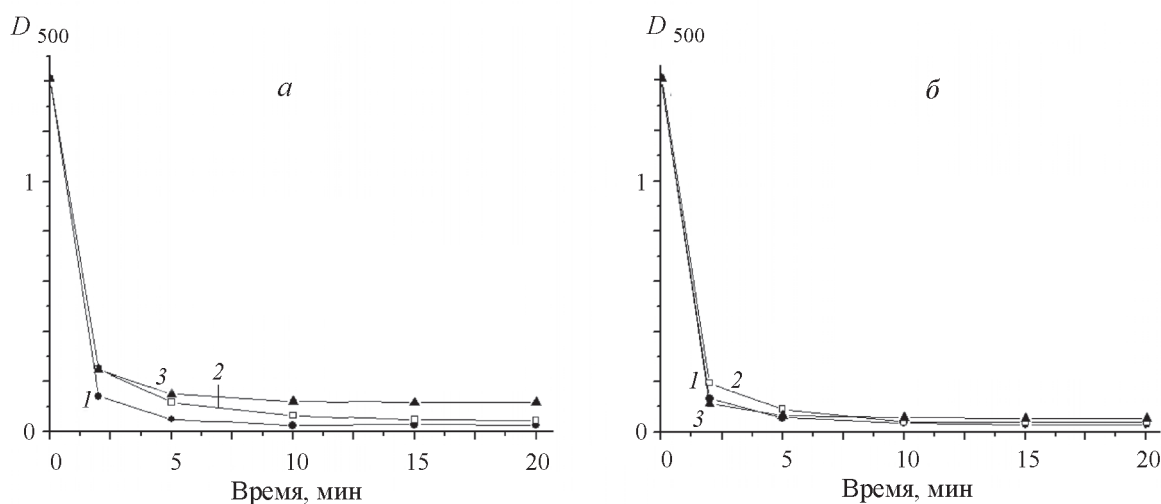


Рис. 4. Кинетические зависимости оптической плотности 0,1% каолиновых суспензий при $T = 20$ °С в присутствии сшитого катионного кукурузного (а) крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,16$; 1,0% ЭХГ) и сшитого катионного картофельного (б) крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,21$; 1,0% ЭХГ) в дозе 2,5 мг/г_{каолин} при разных значениях pH: 1 – 3,0; 2 – 6,0; 3 – 10,5

размерами макромолекул в растворе, которые в большой степени зависят от заряда микроионов и жесткости полимерной цепи.

Из данных, представленных на рис. 4, видно, что, проявляя высокую скорость и эффективность по дестабилизации дисперсии каолина при низкой дозе (2,5 мг/г_{каолин}), катионные флокулянты на основе сшитых картофельного и кукурузного крахмалов работают одинаково хорошо в широком диапазоне pH (3,0–10,5), что в значительной степени расширяет возможные области применения таких новых катионных флокулянтов.

Из данных, представленных на рис. 5, видно, что в температурном интервале 20–80 °С водные дисперсии сшитых ЭХГ в дозе 0,5% катионных картофельных крахмалов проявляют ярко выраженные псевдопластичные свойства, при этом их динамическая вязкость может изменяться в очень широких пределах:

увеличиваться (до 275 Па·с) с уменьшением скорости сдвига и уменьшаться (до 1 Па·с) при увеличении скорости сдвига. Видно также характерное уменьшение динамической вязкости этих дисперсий с увеличением температуры при сохранении общего вида кривой течения.

В целях оценки качества сшивки при разных значениях температуры, времени и дозы ЭХГ изучены водопоглощение и растворимость синтезированных сшитых катионных картофельных крахмалов (таблица). Из таблицы видно, что в зависимости от температуры сшитые катионные крахмалы по отношению к воде ведут себя по-разному: при $T = 45$ °С получены образцы с максимальным водопоглощением и растворимостью. С увеличением времени синтеза эти показатели незначительно возрастают. При этом наблюдается закономерное влияние дозы

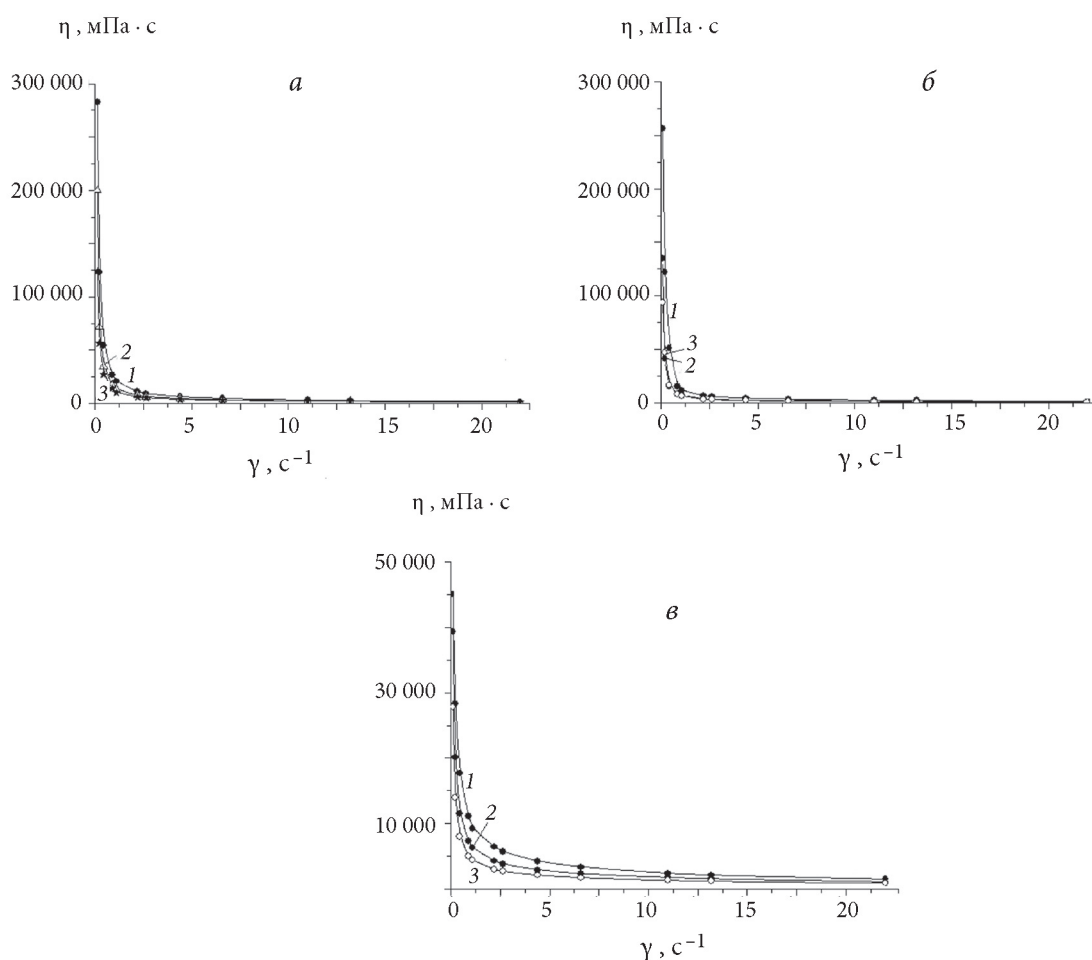


Рис. 5. Зависимость динамической вязкости 1%-х водных дисперсий сшитого катионного картофельного крахмала (при температуре °С: 1 – 20, 2 – 50, 3 – 80), синтезированного при $T = 45$ °С в присутствии 0,5% ЭХГ (время синтеза, ч: а – 24; б – 48; в – 72)

Условия получения и физико-химические свойства сшитых ЭХГ катионных картофельных крахмалов

Условия получения образцов сшитых крахмалов			C _З _{кат.}	N _{кат.} , %	Водопоглощение, г/г	Растворимость, %
T, °C	время, ч	доза ЭХГ, %				
45	24	0,25	0,21	1,53	120,7	21,1
	48		0,21	1,51	153,1	41,7
	72		0,22	1,55	164,8	50,7
	24	0,5	0,20	1,48	118,5	13,6
	48		0,19	1,38	129,2	20,2
	72		0,20	1,48	132,6	26,6
	24	1,0	0,21	1,50	30,2	0,6
	48		0,22	1,55	55,3	4,4
	72		0,22	1,55	57,8	4,6
	24	5,0	0,16	1,20	11,4	0
	48		0,20	1,50	11,1	0
	72		0,20	1,51	11,1	1,1
20	24	0,25	0,12	0,91	76,5	2,9
	48		0,15	1,13	68,0	2,2
	72		0,16	1,18	60,1	1,1
	24	0,5	0,10	0,80	49,2	1,3
	48		0,12	0,90	48,6	1,9
	72		0,13	0,98	50,0	2,1
	24	1,0	0,092	0,73	15,6	0,96
	48		0,12	0,91	21,8	0,55
	72		0,12	0,92	20,9	0,10
	24	5,0	0,093	0,74	7,0	0,3
	48		0,12	0,90	9,8	1,8
	72		0,12	0,91	11,1	1,1

сшивающего агента на водопоглощение и растворимость: с увеличением дозы ЭХГ водопоглощение и растворимость снижаются при проведении реакции как при 45, так и при 20 °C. При использовании 5% ЭХГ растворимость сшитых катионных крахмалов достигает нуля, однако, синтезированные в таких условиях образцы имеют значительно более низкое водопоглощение, что может сказаться на их потребительских свойствах.

Выводы

1. Разработан эффективный способ одностадийного синтеза поперечносшитых высокозаме-

щенных катионных крахмалов, диспергируемых в холодной воде с образованием коллоидных растворов при использовании в качестве сшивающего агента ЭХГ; синтезированы экспериментальные образцы поперечносшитого катионного картофельного и кукурузного крахмалов с регулируемыми вязкостными свойствами и водопоглощением.

2. Полученные сшитые катионные крахмалы сохраняют гранулярную структуру, а степень кристалличности образцов независимо от температуры (20–45 °C), времени реакции (24–72 ч) и дозы сшивающего агента (0,25–5,0%) снижается незначительно (на 5–10%).

3. Вязкость водных растворов росла с увеличением количества сшивающего агента (ЭХГ в смеси) и концентрации полимера в растворе как для картофельного, так и для кукурузного крахмалов. Все растворы синтезированных модифицированных крахмалов при приложении нагрузки имеют псевдопластический характер течения (неньютоновские жидкости) в широком температурном диапазоне (20–80 °С), что важно при использовании в буровых растворах.

4. Скорость флокуляции каолиновых суспензий возрастает при увеличении дозы флокулянта для всех видов катионных крахмалов (картфельного и кукурузного); показано, что независимо от дозы максимальные скорости седиментации

каолина в модельных системах наблюдаются при использовании сшитого катионного картфельного крахмала.

5. Зависимость эффективности флокуляции модельных 0,1%-х каолиновых суспензий от дозы сшитого катионного крахмала проходит через максимум в области 1,0–5,0 мг/г_{каолин} в зависимости от вида используемого крахмала.

6. Сшитые ЭХГ катионные картфельные и кукурузные крахмалы в широком интервале значений рН (3,0–10,5) и температуры (10–50 °С) проявляют высокую скорость и эффективность флокуляции модельных 0,1%-х каолиновых суспензий, что расширяет возможные области их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prado H.J. // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 52. P. 53.
2. Способ получения катионного крахмала для бумажной промышленности сухим методом: Пат. № 17335. ВУ, МПК⁷ С 08В 31/00, D 21Н 17/29 / С.М. Бутрим, Т.Д. Бильдюкевич, Н.С. Бутрим, Т.Л. Юркштович; заявка № а20110750; заявитель Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». заявл. 01.06.2011; опублик. 08.02.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013.
3. Способ получения катионсодержащего крахмала: Пат. № 12797. ВУ, МПК⁷ С 08В 30/00, D 21Н 17/00 / В.В. Литвяк, З.В. Ловкис, Е.В. Ребенок; заявка № а200612200; заявитель РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». заявл. 29.11.2006; опублик. 28.02.2010 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2010.
4. Способ получения катионного крахмала: Пат. № 17474. ВУ, МПК⁷ С 08В 31/00 / В.В. Литвяк, З.В. Ловкис, Е.В. Ребенок; заявка № а2011079; заявитель РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». заявл. 05.08.2011; опублик. 30.08.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013.
5. Способ получения катионсодержащего сшитого крахмалопродукта: Пат. № 17557. ВУ, МПК⁷ С 08В 31/00 / В.В. Литвяк, З.В. Ловкис, Е.В. Ребенок; заявка № -а20111080; заявитель РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». заявл. 05.08.2011; опублик. 30.10.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013.
6. Абрамова Л.И. и др. Полиакриламид. М., 1992. 192 с.
7. Мягченков В.А. и др. Полиакриамидные флокулянты. Казань, 1998. 39 с.
8. Pal S., Sen G., Ghosh S., Singh R.P. // *Carbohydr. Polym.* 2012. Vol. 87. P. 336.
9. Sen G., Kumar R., Ghosh S., Pal S. // *Carbohydr. Polym.* 2009. Vol. 77. P. 822.
10. Ghimici L., Nichifor M. // *Bioresour. Technol.* 2010. Vol. 101. P. 8549.
11. Wie Y., Cheng F., Zhen H. // *Carbohydr. Polym.* 2008. Vol. 74. P. 673.
12. Zhang B., Su H., Gu X., Huang X., Wang H. // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2013. Vol. 436. P. 443.
13. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Пер. с англ. Р.С. Гвоздовер, Л.Ф. Комоловой. Кн. 1. М., 1984. 303 с.
14. Литвяк В.В., Оспанкулова Г.Х., Шаймерденова Д.А., Юркштович Н.К., Бутрим С.М., Росляков Ю.Ф. Атлас: морфология полисахаридов. Астана, 2016. 335 с.
15. Akeeseenko M., Batyan A., Butrim S., Hrabovska E., Litvyak V., Luhn V., Melsitova I., Ospankulova G., Poznyak S., Polumbryk M., Roslyakov Y., Ryzhkova V., Trusevich M., Yurkshtovich N. Atlas nanomorphology of Objects of Organic and Inorganic Nature. Ed. V. Litvyak. Minsk, 2019. 220 p.
16. Бёккер Ю. Спектроскопия. М., 2009. 528 с.
17. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение. М., 1982. 328 с.
18. Lindon J. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. Academic Press, 2010. 3312 p.
19. Stuart B.H. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Wiley, 2004. 242 p.
20. Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro: Методическое указание / В.Е. Крупенникова, В.Д. Раднаева, Б.Б. Танганов. Улан-Удэ, 2011. 48 с.
21. Определение динамической вязкости на ротаци-

- онном вискозиметре Brookfield LVDV-II+ Pro. Методические указания к лабораторной работе: Метод. указания / Казан. нац. иссл. технол. ун-т. Сост.: К.А. Мишагин. Казань, 2020. 32 с.
22. Leach H.W., McCowen L.D., Schoch T.J. // *Cereal Chemistry*. 1959. Vol. 36. P. 534.
23. Способ получения катионного крахмала: Пат. № 12849. ВУ, МПК⁷ С 08В 31/00 / С.М. Бутрим, Н.С. Бутрим, Т.Д. Бильдюкевич, Т.Л., Юркштович;
- заявка № a20080095; заявитель Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». заявл. 29.01.2008; опубл. 30.01.2009 // Афіційны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. 2009.
24. Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Юркштович Т.Л. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. № 3. С. 83.

Информация об авторах

Сергей Михайлович Бутрим – вед. науч. сотр. Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», канд. хим. наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9791-2959> (butryms@bsu.by);

Татьяна Дмитриевна Бильдюкевич – ст. науч. сотр. Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», канд. хим. наук (bildyukevich@gmail.com);

Наталья Степановна Бутрим – науч. сотр. Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6218-4199> (Natalie2906@rambler.ru);

Владимир Владимирович Литвяк – вед. науч. сотр. Всероссийского научно-исследовательского института крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха», докт. техн. наук, канд. хим. наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586> (besserk1974@mail.ru).

Вклад авторов

Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Литвяк В.В. равной степени проводили эксперимент, обсуждали и оформляли полученные результаты. Бутрим С.М. осуществлял общее руководство работой.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 31.05.2023;
одобрена после рецензирования 16.06.2023;
принята к публикации 25.11.2023.