

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 664.282

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОЗАМЕЩЕННЫХ
ПОПЕРЕЧНОСШИТЫХ ТРИМЕТАФОСФАТОМ НАТРИЯ 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. Исследованы закономерности и разработан метод одностадийной катионизации и поперечной сшивки картофельного и кукурузного крахмалов с использованием в качестве сшивающего агента триметафосфата натрия. 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 (0,05–5,0%) снижается очень незначительно. Показано, что при одностадийном процессе эффективность реакции фосфорилирования крахмала уменьшается при увеличении концентрации триметафосфата натрия в системе, при этом эффективность реакции катионизации не изменяется. Установлено, что скорость флокуляции каолиновых суспензий возрастает при увеличении дозы флокулянта для всех видов катионных крахмалов. Показано, что независимо от дозы максимальные скорости седиментации каолина в модельных системах наблюдаются при использовании сшитого катионного картофельного крахмала. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологии получения биodeградируемых сшитых катионных крахмалов в целях их дальнейшего использования при полимерном заводнении для увеличения нефтеотдачи пласта, а также в качестве эффективных флокулянтов для очистки водных растворов как альтернатива синтетическим производным полиакриламида.

Ключевые слова: крахмал, катионизация, поперечное сшивание, триметафосфат натрия, вязкость, флокуляция

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-4-340-350

Финансирование. Исследование выполнено в рамках бюджетного финансирования Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

Для цитирования: Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Литвяк В.В. Получение и изучение свойств высокозамещенных поперечносшитых триметафосфатом натрия катионных крахмалов различного ботанического происхождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 4. С. 340–350.

ORIGINAL ARTICLE

**OBTAINING AND STUDYING THE PROPERTIES OF HIGHLY
SUBSTITUTED CROSS-LINKING WITH SODIUM TRIMETAPHOSPHATE
CATIONIC STARCHES OF VARIOUS BOTANICAL ORIGIN**

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 sodium trimetaphosphate as a cross-linking agent. 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 shown that in a one-stage process, the efficiency of the starch phosphorylation reaction decreases with an increase in the concentration of sodium trimetaphosphate in the system, while the efficiency of the cationization reaction does not change. 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, sodium trimetaphosphate, viscosity, flocculation

Financial support. The study was carried out within the framework of budgetary financing of the Institution of the Belarusian State University “Research Institute of Physical and Chemical Problems”.

For citation: Butrim S.M., Bil'dyukevich T.D., Butrim N.S., Litvyak V.V. Obtaining and studying the properties of highly substituted with sodium trimetaphosphate cation starches of various botanical origin // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 4. S. 340–350.

В настоящее время большое внимания уделяется разработке инновационных технологий модифицированных крахмалов, в частности катионных [1–32]. К катионным крахмалам относится большая группа химически модифицированных крахмалов, молекулы которых обладают положительным зарядом за счет взаимодействия с веществами, содержащими аминные, иминные, аммонийные, сульфониевые, фосфониевые и другие функциональные группировки [13].

Функциональные свойства и перспективы применения катионных крахмалов в разных от-

раслях промышленности принято оценивать в основном по величине степени замещения (СЗ), которая показывает число замещенных гидроксильных групп, приходящихся на каждое глюкопиранозное звено полимерной цепи [33]. Максимальное значение, которое может принимать СЗ, равно трем [34]. По величине СЗ катионные крахмалы подразделяются на низко- (0,01–0,2) и высокозамещенные (>0,2). Степень замещения катионных крахмалов, применяемых в промышленности, колеблется в пределах 0,02–0,1 [35–42].

Однако величина СЗ является лишь косвенной характеристикой ионной силы катионного крахмала и не в полной мере отражает его ионизацию [43]. Функциональные свойства катионных крахмалов с одинаковым значением СЗ отличаются в зависимости от способа его получения, молекулярной массы, содержания амилопектина и амилозы.

Цель настоящего исследования состояла в получении и исследовании свойств высокозамещенных поперечносшитых триметафосфатом натрия катионных крахмалов, имеющих разное ботаническое происхождение.

Объект и методы исследования

Объект исследований. Объектом исследования являлись нативный картофельный крахмал по ГОСТ Р 53876-2010, нативный кукурузный крахмал по ГОСТ 32159-2013, поперечносшитые катионные картофельные и кукурузные крахмалы.

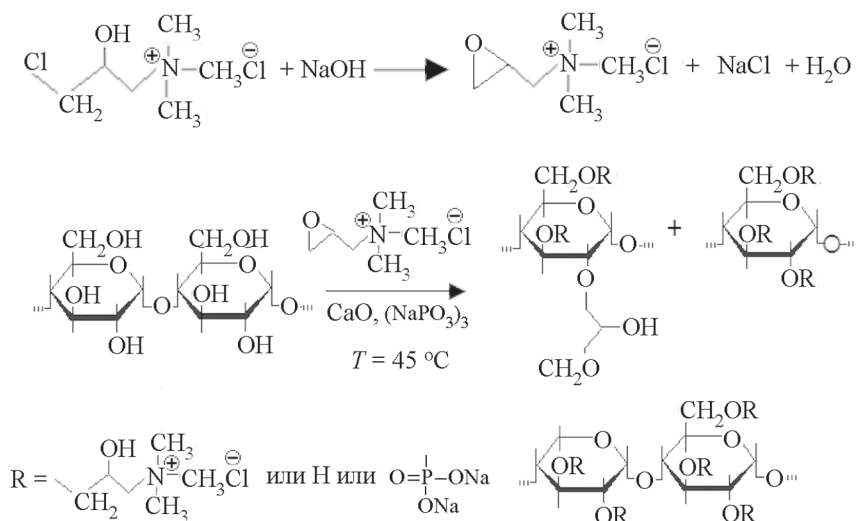
Физико-химические методы исследований. Запись дифракционных кривых проводили на рентгеновском дифрактометре HZG-4A (Carl Zeiss Jena), CuK_α -излучение, Ni-фильтр, поточечная запись. Препарирование образцов осуществляли методом холодного прессования полимера в виде монолитных круглых таблеток толщиной 2 мм и диаметром 18 мм. Относительную степень кристалличности рассчитывали по отношению интенсивностей I_k/I_0 , где I_k – интенсивность дифракции рентгеновских лучей на кристаллических областях; I_0 – общая интенсивность дифракции рентгеновских лучей.

Морфологию структурных элементов, составляющих частицы нативного крахмала и приготовленных образцов модифицированного крахмала, изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 (Германия) [44–46]. 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 ЕМТЕСН К 550Х (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 [47–50].

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 $\text{мг/г}_{\text{каолин}}$, затем перемешивали на магнитной мешалке в течение 5 мин со скоростью 300 об/мин и еще 2 мин при 180 об/мин. По истечении необходимого времени выдержки отбирали аликвоту (2,5 мл) на половине высоты слоя суспензии и измеряли оптическую плотность при $\lambda = 500\text{ нм}$ на UV/VIS-спектрофотометре SP8001 (Metertech, Тайвань). Эффективность

Схема



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 $\lambda = 500$ нм после выдержки суспензии в течение времени t ; D_0 – оптическая плотность суспензии при $\lambda = 500$ нм в начале теста. Относительная погрешность измерения оптической плотности 0,2%.

Результаты и их обсуждение

В основании метода синтеза поперечносшитых катионных крахмалов использован наш способ [51, 52] с внесением в него изменений по мольному соотношению исходных компонентов

и одновременным введением сшивающего агента – триметафосфата натрия ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$), что позволило получить диспергируемые в холодной воде сшитые катионные крахмалы с высокой степенью замещения и высокой вязкостью их водных дисперсий (схема).

Как видно из гистограммы, приведенной на рис. 1, а, эффективность катионизации крахмала в значительной степени зависит от его природы, что связано с различиями в надмолекулярной структуре и морфологии гранул исходных крахмалов. Наибольшие скорость и степень катионизации характерны для картофельного крахмала, а наименьшие – для кукурузного. Так, например, для картофельного крахмала эффективность катионизации достигает 89,3%, а для кукурузного

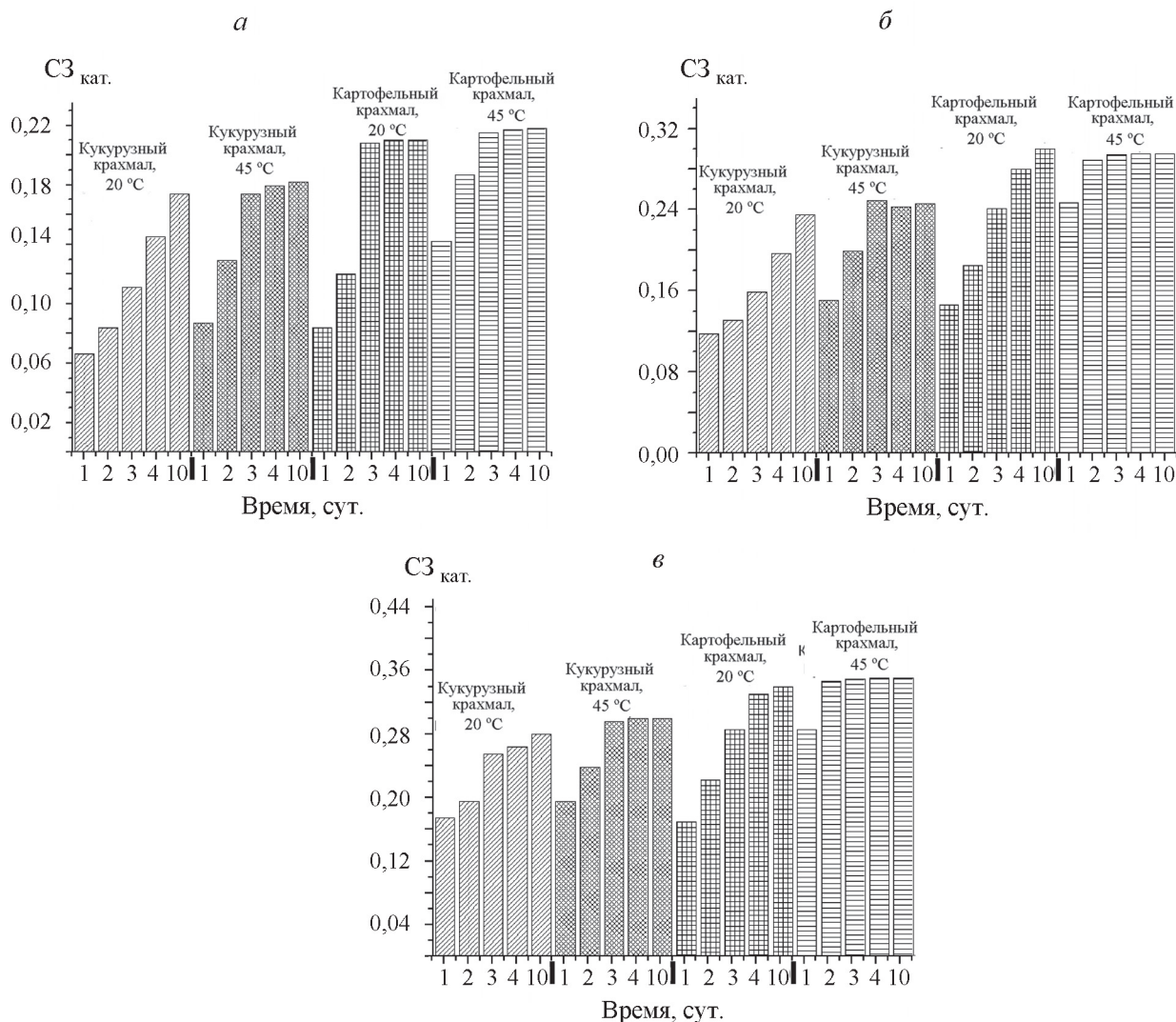


Рис. 1. Гистограммы катионизации полусухим способом различных видов крахмала от времени реакции ($T = 20^\circ\text{C}$, $T = 45^\circ\text{C}$, 0,25% (NaPO_3), мольное соотношение компонентов в системе крахмал : ХГПТМАХ : $[\text{CaO} + \text{NaOH}] : \text{H}_2\text{O}$ составляет 1:0,24:0,48:2,8 (а); 1:0,35:0,70:4,0 (б); 1:0,45:0,90:5,3 (в))

крахмала – 71,2%. Такой способ катионизации крахмала позволяет сохранять его гранулярную структуру и при достижении определенной степени замещения ($СЗ_{\text{кат.}} > 0,1$) 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 ($СЗ_{\text{кат.}} = 0,02\text{--}0,07$), растворимых только в горячей воде. Как видно из рис. 1, а, проведение реакции при комнатной температуре максимальное содержание катионных групп у картофельного крахмала достигается уже на третьи сутки.

Катионизация крахмалов до более высоких степеней замещения требует увеличения расхода катионного реагента и катализатора (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, необходимое для достижения максимальной степени катионизации изученных нативных крахмалов (до 2 и 3 сут. соответственно для картофельного и кукурузного крахмалов при $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$). 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 эф-

фективности катионизации крахмалов в таких смесях. Так, для картофельного крахмала максимальная эффективность катионизации достигает 84,2 и 77,6%, а для кукурузного крахмала – 67,1 и 60,1% (рис. 1, б, в).

Образование катионных эфиров крахмала подтверждено результатами элементного и ИК-спектроскопического анализов. В ИК-Фурье-спектрах сшитого катионного крахмала наблюдается появление полосы валентных колебаний связи $\nu(\text{C-N})$ при 1476 см^{-1} , интенсивность которой возрастает при увеличении степени замещения по катионным группам.

При проведении катионизации и поперечной сшивки крахмала 3-хлоро-2-гидроксипропилтриметиламмоний хлоридом в щелочной среде могут происходить изменения надмолекулярной структуры и морфологии гранул полисахарида, 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 обоих видов крахмалов после их катионизации в разных условиях. Видно, что основные рефлексy, характерные для картофельного ($2\theta = 14,1\text{ град.}$; $2\theta = 17,0\text{ град.}$; $2\theta = 19,5\text{ град.}$ и $2\theta = 22,1\text{ град.}$), кукурузного ($2\theta = 15,1\text{ град.}$; $2\theta = 17,2\text{ град.}$; $2\theta = 17,9\text{ град.}$ и $2\theta = 22,9\text{ град.}$) крахмалов отчетливо выражены во всех образцах их сшитых катионных

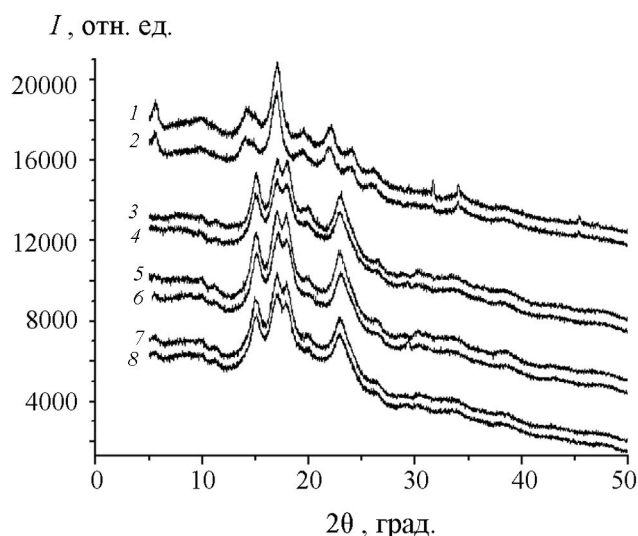


Рис. 2. Дифрактограммы нативных крахмалов: 1 – картофельного, 3 – кукурузного; дифрактограммы сшитых катионных крахмалов: 2 – картофельного, (4–8) – кукурузного; мольное соотношение компонентов в системе крахмал : ХГПТМАХ : $[\text{CaO} + \text{NaOH}]$: $\text{H}_2\text{O} = 1:0,24:0,48:2,8$

производных даже после 4 сут. реакции в этих условиях. Из дифрактограмм видно, что несколько уменьшается пиковая интенсивность дифракционных максимумов, при этом их положение и ширина не меняются, что может говорить об общем незначительном уменьшении доли кристаллических областей в сшитом катионном крахмале при сохранении параметров кристаллической ячейки и размеров самих кристаллитов.

Несмотря на незначительную аморфизацию крахмалов после их катионизации следует отметить, что все сшитые катионные крахмалы, имеющие $CZ_{\text{кат.}} > 0,1$, легко диспергируются в холодной воде с образованием однородных вязких клейстеров. Такое поведение сшитых высокозамещенных катионных крахмалов в воде связано с такими факторами, как высокая гидрофильность и большой объем введенных четвертичных аммониевых групп, способствующих разрушению межмолекулярных водородных связей, несмотря на увеличение молекулярной массы полисахарида в ходе одновременной катионизации и сшивки. Как видно из рис. 3, одновременная сшивка и катионизация как картофельного, так и кукурузного крахмалов сопровождается сохранением их гранулярной структуры. Резуль-

таты исследований кинетики и эффективности флокуляции модельных каолиновых суспензий синтезированными сшитыми катионными крахмалами разного ботанического происхождения представлены на рис. 4–6. Видно, что каолиновые суспензии в отсутствие флокулянта достаточно стабильны в течение длительного промежутка времени (рис. 4). Введение в систему сшитого катионного крахмала приводит к быстрой дестабилизации каолиновых дисперсий, при этом для всех катионных крахмалов с увеличением дозы в интервале 0,5–7,5 мг/г_{каолин} скорость флокуляции частиц дисперсий каолина возрастает. Следует отметить, что наиболее эффективно и с наибольшей скоростью происходит флокуляция дисперсий каолина в присутствии сшитого катионного картофельного крахмала ($CZ_{\text{кат.}} = 0,183$) (рис. 4). 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 более узком интервале доз (1,0–2,5 мг/г_{каолин}).

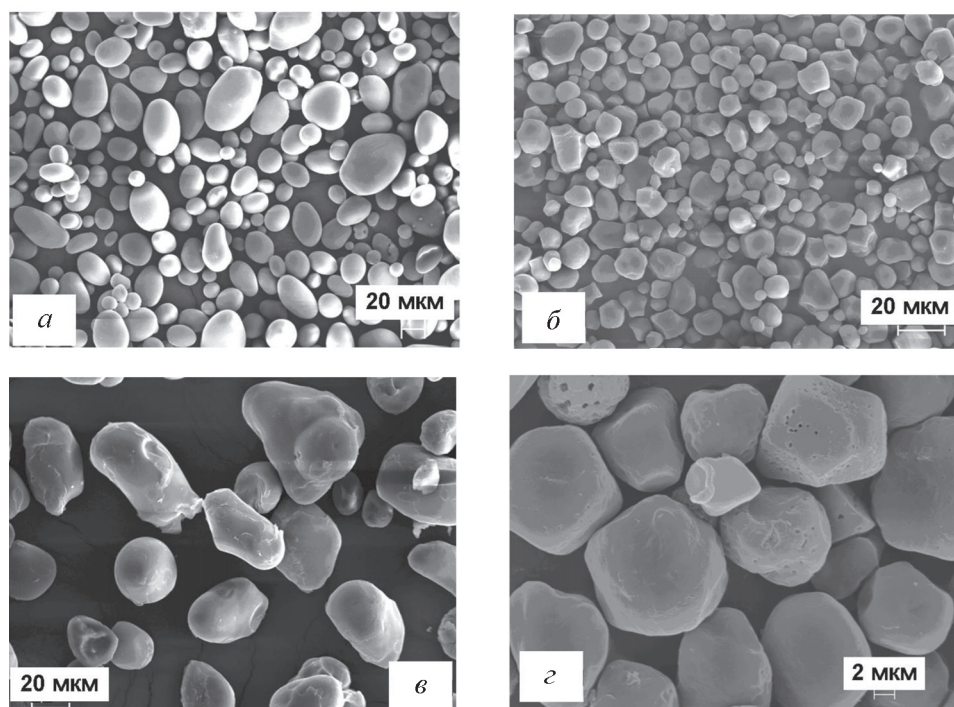


Рис. 3. Электронные микрофотографии гранул нативных крахмалов: а – картофельного, б – кукурузного; сшитых катионных крахмалов: в – картофельный, г – кукурузного ($T = 20^\circ\text{C}$, 0,25% $(\text{NaPO}_3)_3$, $t = 10$ сут., молярное соотношение компонентов в системе крахмал : ХГПТМАХ : $[\text{CaO} + \text{NaOH}] : \text{H}_2\text{O} = 1:0,24:0,48:2,8$)

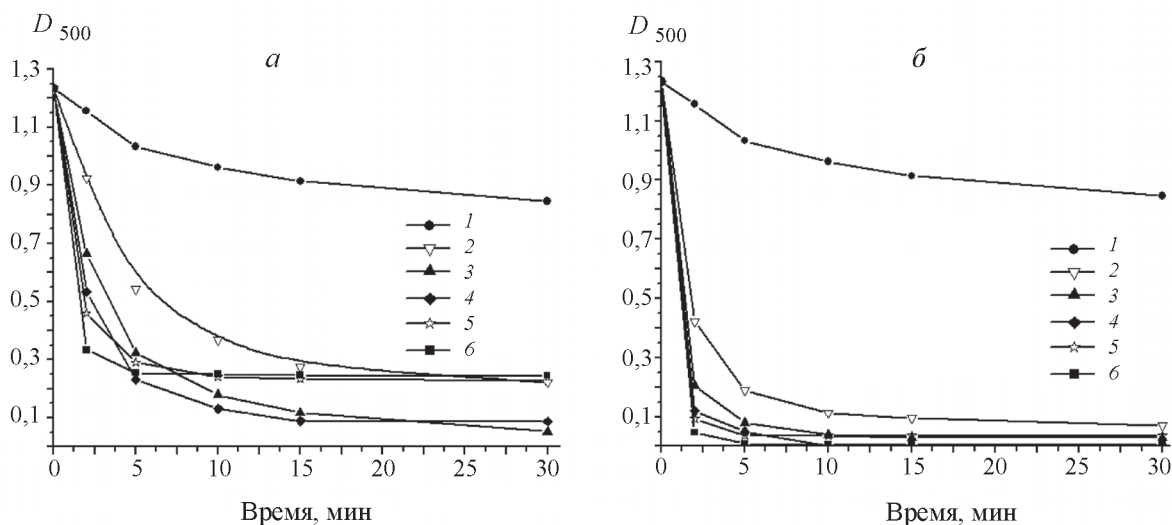


Рис. 4. Кинетические кривые флокуляции 0,1%-х каолиновых суспензий при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в присутствии различных доз сшитых катионных крахмалов: *а* – кукурузного ($\text{CЗ}_{\text{кат.}} = 0,174$), *б* – картофельного ($\text{CЗ}_{\text{кат.}} = 0,183$) (1 – без флокулянта, 2 – 0,5 мг/г, 3 – 1,0 мг/г, 4 – 2,5 мг/г, 5 – 5,0 мг/г, 6 – 7,5 мг/г)

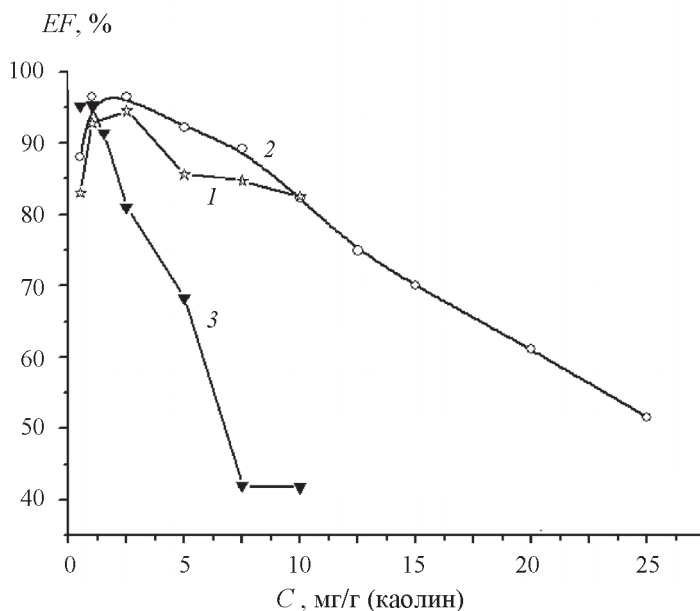


Рис. 5. Зависимость эффективности флокуляции 0,1%-х каолиновых суспензий ($t_{\text{сед.}} = 15\text{ мин.}$, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) от дозы различных катионных флокулянтов сшитых катионных крахмалов: 1 – кукурузного ($\text{CЗ}_{\text{кат.}} = 0,174$), 2 – картофельного ($\text{CЗ}_{\text{кат.}} = 0,183$), 3 – Zetag[®] 8165

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. Так, при одинаковом содер-

жании катионных групп в макромолекулах более эффективно проявляет флокулирующие свойства при низкой дозе 0,5–1,0 мг/г_{каолин} сшитый катионный картофельный крахмал ($\eta = 53\text{ мПа}\cdot\text{с}$), по сравнению с кукурузным ($\eta = 12\text{ мПа}\cdot\text{с}$), имеющим при этом более низкое значение динамической вязкости, а следовательно, и молекулярной массы. Таким образом, эффективность флокуля-

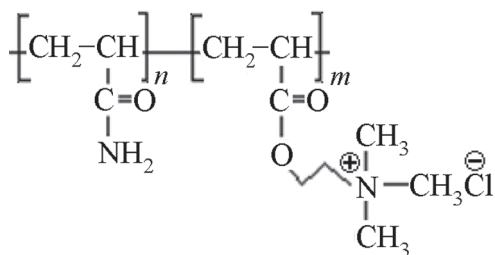


Рис. 6. Структурная формула
 Zetag®8165

ции минеральных систем может определяться не только молекулярной массой полимера, но и размерами макромолекул в растворе, которые в большой степени зависят от заряда макроионов и жесткости полимерной цепи.

На рис. 5 приведены зависимости эффективности флокуляции дисперсий каолина под действием различных сшитых катионных крахмалов по сравнению с синтетическим катионным флокулянтom – сополимером акриламида и N,N,N-триметил-2-[(1-оксо-2-пропенил)окси]этан аммоний хлорида Zetag®8165, структурная формула которого имеет вид, представленный на рис. 6. Видно, что, проявляя высокую эффективность по дестабилизации дисперсии каолина при низкой дозе (0,5 мг/г_{каолин}), синтетический флокулянт Zetag®8165 в отличие

от исследуемых сшитых катионных крахмалов имеет очень узкую область флокуляции (0,5–1,0 мг/г_{каолин}), что в значительной степени затрудняет управление этим процессом и повышает опасность ухудшения агрегации частиц при незначительном отклонении от оптимальной дозы реагента.

Такая активность синтетического флокулянта связана, вероятно, с тем, что он имеет очень высокие значения плотности заряда, молекулярной массы ($\eta = 485$ мПа·с) и жесткости полимерного каркаса. Это позволяет ему быстро адсорбироваться по мостичному механизму на отрицательно заряженных частицах каолина, вызывая образование больших и плотных флокулов при достаточно низкой дозе реагента.

На рис. 7 приведены кинетические кривые флокуляции 0,1, 0,5 и 1,0%-х дисперсий каолина сшитым катионным картофельным крахмалом в дозе 2,5 мг/г_{каолин}. Видно, что использование синтезированного сшитого катионного крахмала достаточно эффективно в качестве флокулянта для всех изученных концентраций каолиновых дисперсий, при этом максимальное осветление систем достигается уже в течение 2–5 мин.

Таким образом, разработан метод одностадийной катионизации и поперечной сшивки

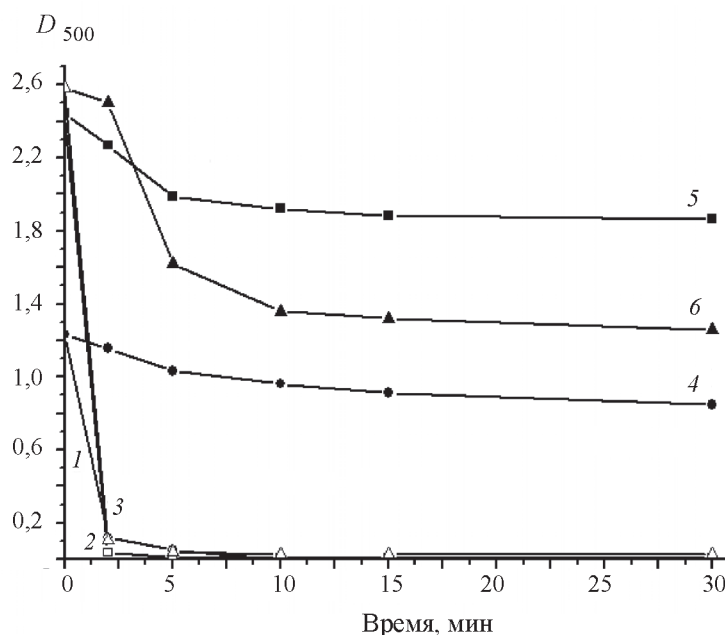


Рис. 7. Кинетические кривые флокуляции 0,1%-х (1, 4), 0,5%-х (2, 5) и 1,0%-х (3, 6) каолиновых суспензий при $T = 20$ °С в присутствии сшитого картофельного крахмала ($C_{\text{З.кат.}} = 0,183$) в дозе 2,5 мг/г_{каолин} (1–3) и без добавления флокулянта (4–6)

Условия получения и свойства сшитых катионных картофельных крахмалов

Условия получения сшитых катионных картофельных крахмалов			CЗ _{кат.}	RE _{кат.} , %	C _p , %	RE _{фос.} , %
T, °C	t, ч	доза ((NaPO ₃) ₃), %				
45	24	0	0,190	77,9	0,056	—
		0,05	0,186	76,2	0,071	98,7
		0,25	0,184	75,4	0,123	88,2
		0,50	0,185	75,8	0,172	76,3
		5,0	0,185	75,8	0,685	41,4
20	24	5,0	0,143	58,6	0,738	44,9
	72		0,186	76,2	0,796	48,7
	24	0,25	0,147	60,2	0,122	86,8
	48		0,183	75,0	0,124	88,2
	72		0,188	77,0	0,127	93,4

картофельного и кукурузного крахмалов с использованием в качестве сшивающего агента триметафосфата натрия. Синтезированы образцы поперечносшитого катионного картофельного и кукурузного крахмалов. Установлено, что полученные сшитые катионные крахмалы сохраняют гранулярную структуру, а степень кристалличности образцов независимо от температуры (20–45 °C), времени реакции (24–96 ч) и дозы сшивающего агента (0,05–5,0%) снижается очень незначительно. Показано, что при одностадийном процессе эффективность реакции фосфорилирования ($RE_{\text{фос.}}$) картофельного крахмала уменьшается при увеличении концентрации триметафосфата натрия в системе, при этом эффективность реакции катионизации ($RE_{\text{кат.}}$) не изменяется (таблица).

Выводы

1. Разработан эффективный способ одностадийного синтеза поперечносшитых высокозамещенных катионных крахмалов, диспергируемых в холодной воде с образованием

коллоидных растворов при использовании в качестве сшивающего агента триметафосфата натрия.

2. Установлено, что:

– 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%);

– скорость флокуляции каолиновых суспензий возрастает при увеличении дозы флокулянта для всех видов катионных крахмалов; показано, что независимо от дозы максимальные значения скорости седиментации каолина в модельных системах наблюдаются при использовании сшитого катионного картофельного крахмала;

– эффективность 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Костик О.А., Будішевська О.Г., Вострес В.Б., Надашкевич З.Я., Воронов С.А. // Chemistry, Technology and Application of Substances. 2019. Vol. 2. N 1. С. 159.
- Carr M. // J. applied polymer science. 1994. Vol. 54. N 12. P. 1855.
- Kato M., Gyoten Y., et al. // Analytical chemistry. 2004. Vol. 76. N 22. P. 6792.
- Kavaliauskaite R., Klimaviciute R., et al. // Carbohydrate Polymers. 2008. Vol. 73. N 4. P 665.
- Khalil M., Farag S. // Starch-Stärke. 1998. Vol. 50. N 6. P. 267.
- Krentz D.O., Lohmann C., et al. // Starch-Stärke. 2006. Vol. 58. N 3–4. P. 161.
- Nachtergaele W. // Starch-Stärke. 1989. Vol. 41. N 1. P. 27.
- Nichifor M., Stanciu M.C., et al. // Carbohydrate polymers. 2010. Vol. 82. N 3. P. 965.
- Pal S., Mal D., et al. // Carbohydrate polymers. 2005. Vol. 59. N 4. P. 417.

10. Wei Y., Cheng F., et al. // Carbohydrate polymers. 2008. Vol. 74. N 3. P. 673.
11. Jane J.L., Kasemsuwan T., et al. // Starch-Stärke. 1994. Vol. 46. N 4. P. 121.
12. Lim W.J., Liang Y.T., Seib P.A. // Cereal Chem. 1992. Vol. 69. N 3. P. 237.
13. Жушман А.И. Модифицированные крахмалы. М., 2007. 234 с.
14. Solarek D.B. Modified starches: properties and uses / ed. O.V. Wurzburg, 1986. P. 113–129.
15. Литвяк В.В., Росляков Ю.Ф. // Изв. высших учебных заведений. Сер. Пищевая технология. 2013. № 2–3. С. 31.
16. Литвяк В.В., Канарский А.В. // Пластические массы. 2016. № 7–8. С. 27–31.
17. Коптелова Е.К., Векслер Р.И. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 9. С. 17.
18. Куценко С.А., Винокуров А.Ю., Седов Ю.А. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 10. С. 13.
19. Тарасов С.М. и др. // Лес. вестн. 2010. № 5. С. 152.
20. Тарасов С.М. // Лес. вестн. 2007. № 4. С. 120.
21. Братская С.Ю. и др. // Журн. приклад. химии. 2008. Т. 81. № 5. С. 825.
22. Бутрим С.М. и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2013. Т. 56. № 3. С. 83.
23. Бутрим С.М. и др. // Коллоид. журн. 2016. Т. 78. № 3. С. 298.
24. Бутрим С.М. и др. // Химия природ. соединений. 2011. № 2. С. 172.
25. Бутрим С.М. и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. № 1. С. 89.
26. Куценко С.А., Винокуров А.Ю., Седов Ю.А. // Фундамент. и приклад. проблемы техники и технологии. 2010. № 5 (283). С. 20.
27. Коптелова Е.К., Ахаева С.М., Лукин Н.Д. // Хранение и перераб. сельхозсырья. 2015. № 12. С. 23.
28. Коптелова Е.К., Лукин Н.Д., Ахаева С.М. // Хранение и перераб. сельхозсырья. 2018. № 2. С. 48.
29. Винокуров А.Ю. и др. // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18. № 19. С. 135.
30. Литвяк В.В. // Весці НАН Беларусі. Сер. аграр. навук. 2019. № 1. Т. 57. С. 110.
31. Литвяк В.В. // Навукові праці Національного університету харчових технологій. 2019. № 1. Т. 25. С. 254.
32. Литвяк В.В. // Изв. высших учебных заведений. Сер. Пищевая технология. 2019. № 1. С. 17.
33. Genest S., Schwarz S., Petzold-Welcke K., Heinze T., Voit B. // Starch/Stärke. 2013. Vol. 65. P. 1.
34. Копыльцов А.А. // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 10. С. 48.
35. Berzin F., Tara A., Tighzert L., Vergnes B. // Polymer engineering and science. 2007. Vol. 47. P. 112.
36. Della Valle G., Colonna P., Tayeb J. // Starch/Stärke. 1991. Vol. 43. P. 300.
37. Pat. 5227481 US, Int. cl. C08B 11/145; C08B 31/00; C08B 11/00. Cationic polysaccharides and reagents for their preparation / J.J. Tsai, P.T. Trzasko, M.T. Philbin; assignee National Starch and Chemical Investment Holding Corporation. № 683483; prior. 09.04.1991; pub. 13.07.1993.
38. ГОСТ Р 56095-2014 Крахмал катионный. Технические условия (Переиздание). 2014.
39. ТУ РБ 190239501.786-2011 «Крахмал катионный» / В.В. Литвяк // РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». Минск, 2011. 12 с. Государственная регистрация № 032099 от 20.05.2011 г.
40. Извещение об изменении № 1 ТУ ВУ 190239501.786-2011 «Крахмал катионный» / В.В. Литвяк // РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». Минск, 2012. 3 с. Государственная регистрация № 032099/01 от 26.04.2012 г.
41. Извещение об изменении № 2 ТУ ВУ 190239501.786-2011 «Крахмал катионный» / Н.Н. Петюшев, В.В. Литвяк // РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». Минск, 2016. 11 с. Государственная регистрация № 032099/02 от 15.04.2016 г.
42. Извещение об изменении № 3 ТУ ВУ 190239501.786-2011 «Крахмал катионный» / Н.Н. Петюшев, В.В. Литвяк // РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». Минск, 2012. 11 с. Государственная регистрация № 032099/03 от 04.04.2017 г.
43. Копыльцов А.А. // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 4. С. 62.
44. Гоулдстейн Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Ф. Лифшин; Пер. с англ. Р.С. Гвоздовер, Л.Ф. Комоловой. Кн. 1. М., 1984. 303 с.
45. Литвяк В.В., Оспанкулова Г.Х., Шаймерденова Д.А., Юркштович Н.К., Бутрим С.М., Росляков Ю.Ф. Атлас: морфология полисахаридов, 2016. 335 с.
46. Akeeseenko M., Batyan A., Butrim S., Hrabovska E., Litvyak V., Luhin 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.
47. Бёккер Ю. Спектроскопия = Spektroskopie. М., 2009. 528 с.
48. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение. М., 1982. 328 с.
49. Lindon J. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. 2nd Ed. Academic Press, 2010. 3312 p.
50. Stuart B.H. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Wiley, 2004. 242 p.
51. Способ получения катионного крахмала: Патент № 12849. ВУ, МПК⁷ C 08B 31/00 / С.М. Бутрим, Н.С. Бутрим, Т.Д. Бильдюкевич, Т.Л., Юркштович; заявка №а20080095; заявитель Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». заявл. 29.01.2008; опубл. 30.01.2009 // Афіцыйны

бюл. / Нац. центр інтелектуал. власності. 2009.
52. Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Юрк-

штович 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 (bilyukevich@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. 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.