

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ДИАЛЬДЕГИДДЕКСТРАНА

© Т. Л. Юркштович, Ю. И. Пристромова*, Н. В. Голуб,
С. О. Соломевич, Р. И. Костерова

Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета,
220030, г. Минск, ул. Ленинградская, д. 14
* E-mail: prystromyi@gmail.com

Поступила в Редакцию 13 июля 2022 г.

После доработки 25 декабря 2022 г.

Принята к публикации 25 декабря 2022 г.

Исследован процесс гомофазного окисления декстрана водным раствором NaIO_4 и получены образцы диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.12–1.24. Изучено влияние температуры реакции, концентрации окислителя и рН реакционной среды на соотношение окисленных звеньев разного химического состава, молекулярно-массовые характеристики продуктов реакции, растворимость образцов диальдегиддекстрана. Проведена оценка скорости деградации диальдегиддекстрана в растворах при различных значениях рН и показано, что по мере роста количества альдегидных групп в образцах окисленного декстрана скорость гидролиза в растворах с рН 2.0 увеличивается. В растворе с рН 3.5 фиксируется наименьшая степень гидролиза образцов диальдегиддекстрана, которая не зависит от содержания в их составе альдегидных групп.

Ключевые слова: декстран; диальдегиддекстран; гидролиз; периодатное окисление

DOI: 10.31857/S004446182211010X; EDN: GRHPZM

Декстран — полисахарид микробного происхождения, выпускается промышленностью в широком диапазоне молекулярных масс и находит применение в медицине. Декстран биосовместим с тканями организма, характеризуется низкой токсичностью, проявляет антимикробную активность. Декстран с молекулярной массой 35–70 кДа применяется в качестве заменителя плазмы крови, препятствующего образованию тромбов [1]. Высокая реакционная способность декстрана в реакциях окисления, алкилирования, этерификации [1–3] позволяет получать многочисленные производные с новыми физико-химическими и медико-биологическими свойствами, что открывает большие перспективы их использования в различных областях науки и техники, в том числе и в фармации в технологиях получения лекарственных препаратов.

Для этих целей большой интерес представляет диальдегиддекстран, который, как показано в работах [1, 4, 5], не только отвечает критериям биосовместимости и биodeградации, но и стимулирует процессы

восстановления клеток печени. Присутствие в структуре диальдегиддекстрана функционально активных альдегидных групп обеспечивает его способность к ковалентному связыванию биологически активных веществ, содержащих в своем составе первичные аминогруппы, что приводит к пролонгированию их действия.

Периодатное окисление — наиболее известный метод получения диальдегиддекстрана. В литературе имеются многочисленные исследования механизма этой реакции и представлены различные методики окисления декстрана [6, 7]. Сведения о влиянии условий реакции окисления на количество введенных в полисахарид альдегидных групп, физико-химические свойства модифицированных полисахаридов, определяющие безопасность макромолекулярных систем на основе альдегидов полисахаридов для организма, ограничены [3, 4]. Однако эти данные имеют важное значение при создании макромолекулярных систем на основе диальдегиддекстрана, а также его конъюгатов с биологически активными веществами в виде наночастиц [6], гидрогелей [8, 9].

Цель работы — изучение влияния условий проведения реакции периодатного окисления декстрана на структуру и свойства получаемого продукта окисления.

Экспериментальная часть

В качестве исходных материалов использовали декстран с молекулярной массой 70 000 Да (Pharmocos mos A/S) и NaIO_4 (ч.д.а., ООО «Диаэм»).

Окисление декстрана растворами NaIO_4 проводили в соответствии с методикой [6]. Значение pH реакционного раствора варьировали добавлением 0.1 М растворов HCl (стандарт-титр, НТПК «Анализ Х») или NaOH (ч.д.а., ЗАО «Пять океанов»). Величину pH измеряли на pH-метре HI 9321 (HANNA) с использованием комбинированного и стеклянного электродов.

В заданные промежутки времени для прекращения реакции окисления к реакционной смеси добавляли 1.2 мл этиленгликоля (ч.д.а., НП ООО «Беллехимкомплект»), перемешивали в течение 30 мин и диализировали до отсутствия IO_3^- ионов в промывных водах (реакция с KI , ч.д.а., Р.Р.Н. «STANLAB») в кислой среде, индикатор — крахмал «Экстра» (амилоза 23.8 мас%, со степенью полимеризации 1760, ЗАО «Белкрахмал»). Образцы окисленного декстрана лиофильно высушивали.

Для определения степени замещения декстрана (СЗ), равной числу альдегидных групп, входящих в среднем на одно звено макромолекулы, использовали метод потенциометрического титрования с гидрохлоридом гидроксилamina (ч.д.а., ООО «АстраХим») [10]. Степень замещения рассчитывали по уравнению

$$\text{СЗ} = \frac{(V - V_{\text{к}})NM}{m\left(1 - \frac{w}{100}\right)}, \quad (1)$$

где V — объем щелочи, пошедший на титрование выделившейся соляной кислоты (л); $V_{\text{к}}$ — объем щелочи, пошедший на титрование образца немодифицированного декстрана (л); N — концентрация раствора NaOH (моль экв·л⁻¹); M — молекулярная масса декстрана (г·моль⁻¹); m — масса навески (г); w — влажность образца окисленного декстрана (%).

Количество дважды последовательно окисленных звеньев диальдегиддекстрана [схема (I)] определяли по количеству образовавшейся муравьиной кислоты. Для этого аликвоту реакционного раствора после добавления этиленгликоля оттитровывали 0.1 М раствором NaOH , используя в качестве индикатора метиловый красный (ч.д.а., ОАО «Белрахим»).

ИК-спектры образцов записывали при комнатной температуре на ИК-Фурье-спектрометре Bruker ALPHA с приставкой ATR Di в режиме нарушенного полного внутреннего отражения через 2 см⁻¹ в диапазоне 4000–400 см⁻¹, количество сканирований — 24. Для оценки степени разрушения системы водородных связей декстрана в результате реакции окисления определяли величину сдвига максимума поглощения OH-групп ($\Delta\nu_{\text{OH}}^{\text{max}}$), а также индекс симметрии (a/b), где a и b — ширина полос поглощения OH-групп, измеренных от середины перпендикуляра, проведенного через максимум поглощения. Возможность применения этого параметра в качестве показателя однородности расположения функциональных групп показана в работах на примере эфиров крахмала и целлюлозы [11].

Для определения растворимости диальдегиддекстрана использовали гравиметрический метод: к 0.25 г лиофильно высушенного образца приливали 10 мл дистиллированной воды (дистиллятор ДЭ-10М, ООО «Завод «Электромедоборудование») и перемешивали в течение определенного времени при скорости 700 об·мин⁻¹ (температура 25°C). Нерастворившуюся часть образца высушивали в вакуумном шкафу при температуре 50°C в присутствии P_2O_5 (ч.д.а., АО «Вектон») до постоянной массы.

Среднемассовую молекулярную массу (M_w) водорастворимых образцов исходного и модифицированного декстранов определяли методом эксклюзионной хроматографии с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1200 с рефрактометрическим детектором. Разделение проводилось на колонке PL Aquagel-OH 40 (Agilent). В качестве подвижной фазы использовали раствор 0.25% KH_2PO_4 (ч.д.а., ЗАО «Пять океанов»), 0.376% $\text{Na}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$ с добавлением 0.94% NaCl (х.ч., ЗАО «Пять океанов») и 0.02% NaN_3 (ч.д.а., АО «Вектон»). Для построения калибровочного графика использовали стандартные образцы декстранов (Dextran 1T, Pharmacosmos standards) с молекулярными массами 5000, 12 000, 25 000, 50 000, 80 000, 150 000 и 250 000 Да. Среднемассовую молекулярную массу рассчитывали с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation.

Степень деструкции образцов диальдегиддекстрана оценивали по понижению среднемассовой молекулярной массы до и после выдерживания в буферном растворе. Буферные растворы с разным значением pH (2.0; 3.5; 7.4) готовили согласно методике,* для приготовления использовались следующие реактивы:

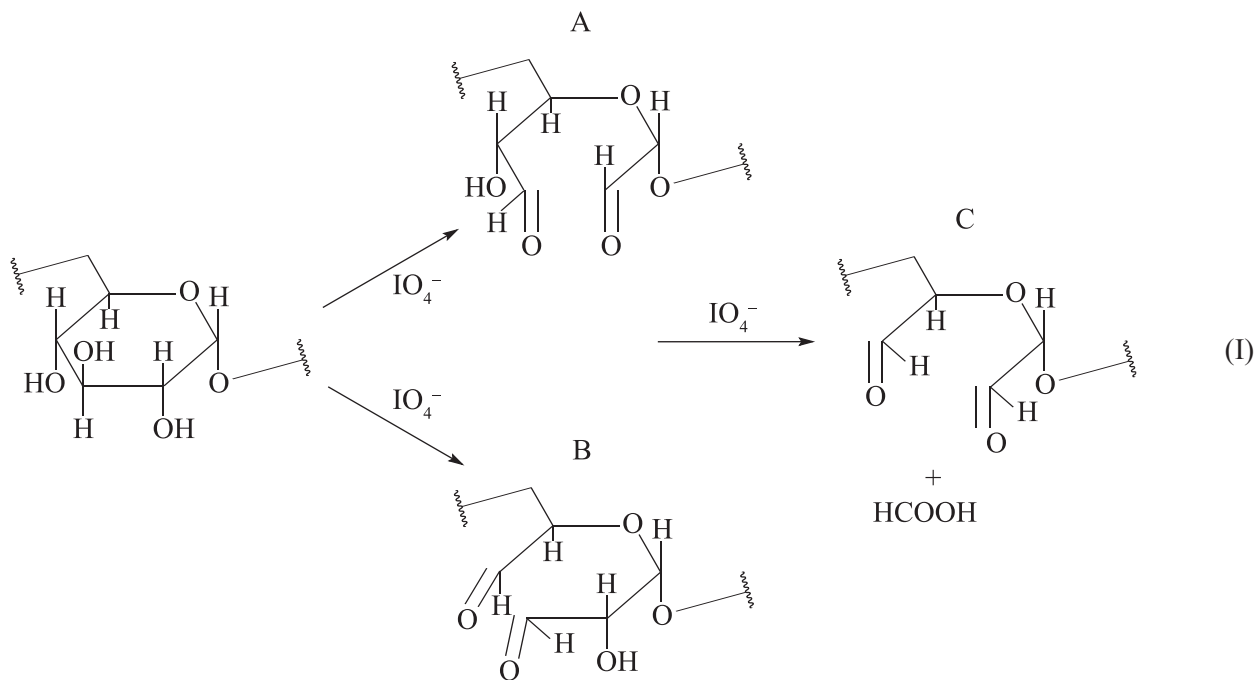
* Государственная фармакопея Республики Беларусь. Т. 1. ОФС. 4.1.7. Буферные растворы.

$\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , кислота уксусная (х.ч., ОАО «Белхим»), NaCl .

Обсуждение результатов

Согласно [1], процесс окисления декстрана NaIO_4 включает следующие параллельно-последовательные реакции (I):

- окисление гидроксильных групп при $\text{C}_2\text{—C}_3$ и $\text{C}_3\text{—C}_4$ (звенья А и В) с разрывом D-глюкопиранозного звена (ГПЗ) и образованием альдегидных групп (I) ;
- окисление альдегидной группы с выделением муравьиной кислоты и образованием новой альдегидной группы (звено С).



На первой стадии окисления на разрыв одной связи $\text{C}_3\text{—C}_4$ или $\text{C}_2\text{—C}_3$ и образование двух альдегидных групп расходуется 1 моль NaIO_4 . Для получения одного D-глюкопиранозного звена типа С необходимо 2 моль NaIO_4 .

Характерной особенностью формы зависимости степени замещения от соотношения NaIO_4 :ГПЗ (моль:моль) является наличие перегиба при NaIO_4 :ГПЗ = 0.5 (рис. 1), что соответствует литературным данным [6]. При NaIO_4 :ГПЗ < 0.5 (моль:моль) мольное отношение образовавшихся альдегидных групп к NaIO_4 составляет 1.6, по мере увеличения концентрации окислителя и получения диальдегиддекстрана со степенью замещения >0.82 этот параметр заметно снижается. Такой характер зависимости обусловлен влиянием концентрации окислителя не только на степень замещения, но и на количественное соотношение одно- и двуокисленных циклов.

При мольном отношении NaIO_4 :ГПЗ < 1.0 образуются образцы диальдегиддекстрана, содержащие все три типа окисленных звеньев (I). Исключение составляют только образцы окисленного декстрана со степенью замещения ≤ 0.20 , которые содержат

одноокисленные циклы А и В. В интервале мольного отношения $0.2 < \text{NaIO}_4$:ГПЗ < 0.5 количество звеньев двуокисленных звеньев, отнесенное к общему количеству окисленных звеньев различного строения, варьируется в узком интервале значений (29.2–34.1%). Однако по мере дальнейшего роста концентрации окислителя доля дважды окисленных

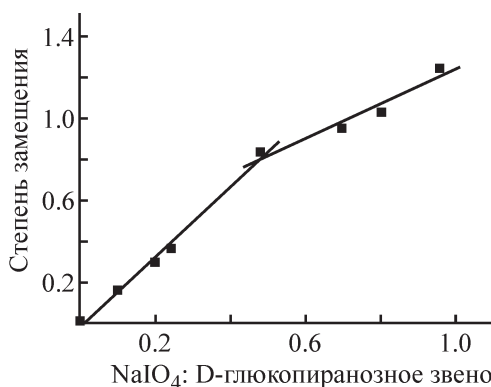


Рис. 1. Зависимость степени замещения окисленного декстрана от соотношения NaIO_4 :D-глюкопиранозное звено (моль:моль) в реакционной смеси ($T = 20^\circ\text{C}$, время реакции 1.0 ч).

Таблица 1

Влияние содержания NaIO_4 в составе окислительной среды на структурные характеристики и выход продуктов реакции окисления декстрана NaIO_4
 $T = 20^\circ\text{C}$, время реакции 1.0 ч

Соотношение ГПЗ: NaIO_4 , моль:моль	Выход окисленного декстрана, %	Степень замещения	Доля двуокисленных звеньев, %	M_w , кДа
1:0.06	80.2	0.08	0	65.7
1:0.10	72.3	0.16	0	62.9
1:0.20	80.5	0.30	0.33	58.7
1:0.24	87.5	0.36	0.33	57.8
1:0.48	83.1	0.42	0.29	47.3
1:0.70	81.6	0.96	0.44	—
1:0.80	79.3	1.04	0.50	—
1:0.96	75.6	1.24	—	25.9

Примечание. «—» — нет данных.

звеньев в составе окисленных образцов увеличивается, и при отношении NaIO_4 :ГПЗ = 0.8 (моль:моль) получены образцы диальдегиддекстрана с равным количеством одно- и двуокисленных звеньев.

При соотношении NaIO_4 :ГПЗ ≤ 0.24 (моль:моль) молекулярная масса продуктов реакции незначительно изменяется по сравнению с исходным декстраном, что указывает на отсутствие существенной деструкции макромолекул. Так, при отношении NaIO_4 :ГПЗ = 0.24 (моль:моль) молекулярная масса образцов диальдегиддекстрана снижается от начальной величины 70.0 до 57.8 кДа. По мере роста концентрации окислителя молекулярная масса окисленных образцов декстрана постепенно уменьшается: при отношении

NaIO_4 :ГПЗ = 0.48 (моль:моль) ее значение падает до 47.3 кДа, а при 0.96 — до 25.9 кДа.

Скорость и предельное значение числа окисленных звеньев декстрана увеличиваются с ростом содержания окислителя. В начальный период времени (5–30 мин) реакция проходит быстро, и, по данным работы [7], процесс окисления может быть описан уравнением реакции второго порядка. Дальнейший рост продолжительности реакции практически не влияет на число окисленных звеньев в диальдегиддекстране, что, основываясь на расчетных данных по определению количества NaIO_4 , необходимого на образование окисленных звеньев разного состава (табл. 1), можно объяснить практически полным рас-

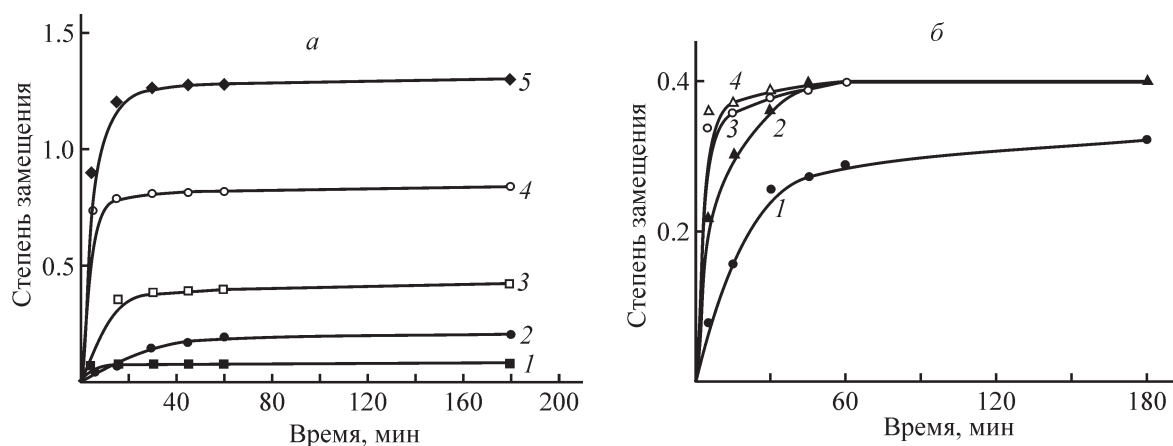


Рис. 2. Кинетические кривые окисления декстрана NaIO_4 при различном составе реакционной смеси (а), различной температуре реакции (б).

Отношение NaIO_4 :D-глюкопиранозное звено (моль:моль): 1 — 0.06, 2 — 0.12, 3 — 0.24, 4 — 0.48, 5 — 0.96 ($T = 20^\circ\text{C}$); температура реакции ($^\circ\text{C}$): 1 — 0.5, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30 (NaIO_4 :D-глюкопиранозное звено = 0.24 моль:моль).

Таблица 2

Зависимость структурных характеристик диальдегиддекстрана от температуры реакции окисления декстрана NaIO_4

Отношение NaIO_4 :гликопиранозное звено = 0.24 моль:моль, время реакции 1.0 ч

Температура реакции, °С	Выход окисленного декстрана, %	Степень замещения	Доля двуокисленных звеньев	M_w , кДа
0.5	89.6	0.30	0.33	58.3
10	86.2	0.36	0.33	56.0
20	87.5	0.36	0.33	57.8
30	86.7	0.36	0.33	55.4

ходом окислителя в течение первого периода реакции окисления.

Повышение температуры в интервале 0.5–10.0°С соответствует увеличению степени окисления диальдегиддекстрана на 20–25% (рис. 2, б). При температуре 10°С степень замещения достигает предельной величины, которая определяется составом окислительной смеси и практически не зависит от изменения температуры. Варьирование температуры при 10–30°С также не оказывает влияния на соотношение окисленных звеньев разного химического строения, среднемассовую молекулярную массу и выход продуктов окисления (табл. 2).

Влияние значений pH окислительной системы на число окисленных звеньев в продуктах окисления, среднемассовую молекулярную массу исследовали при отношении NaIO_4 :ГПЗ = 0.24 (моль:моль). Варьирование значений pH не приводит к изменению степени окисления, количества двуокисленных фрагментов, но значительно влияет на среднемассовую молекулярную массу в конечном продукте (табл. 3). При $\text{pH} \geq 3.9$ молекулярная масса образцов диальдегиддекстрана уменьшилась в 1.5 раза (табл. 3).

Таким образом, при отношении ГПЗ: NaIO_4 = 0.20–0.96 (моль:моль), температуре 0.5–30°С и pH 2.7–6.9 получены образцы диальдегиддекстрана со степенью

замещения 0.08–1.24; при этом реакция окисления с высоким выходом продуктов (74.4–89.6%) завершается менее чем за 1 ч. Основным фактором, влияющим на химическую структуру диальдегиддекстрана, является мольное соотношение реагентов.

В ИК-спектрах образцов диальдегиддекстрана (рис. 3), полученных при различных условиях, полоса поглощения в области 1760–1710 cm^{-1} , обусловленная валентными колебаниями карбонильной группы, либо отсутствует, либо очень слабо выражена. Как отмечено ранее [12, 13], этот факт объясняется тем, что альдегидные группы вступают в реакцию с близлежащими гидроксильными группами, образуя полуацетали различной структуры.

В области 1150–900 cm^{-1} , где проявляются валентные колебания групп C—O—C , C—C , кольцевых структур, деформационных колебаний C—OH -групп [14], спектры образцов диальдегиддекстрана с разной степенью замещения практически не отличаются от спектра исходного декстрана. Наиболее сильные изменения наблюдаются для полосы поглощения в области 2921–2897 cm^{-1} , обусловленной валентными колебаниями групп CH , CH_2 . Можно полагать, что сдвиг полосы $\nu_{\text{C—H}}$ в область больших частот ($\Delta\nu = 20\text{--}24 \text{ cm}^{-1}$) является косвенным доказательством участия одного и того же атома углерода в

Таблица 3

Зависимость структурных характеристик и выхода диальдегиддекстрана от pH окислительной среды в реакции окисления декстрана NaIO_4

Отношение NaIO_4 :ГПЗ = 0.24 моль:моль, $T = 20^\circ\text{C}$, время 1.0 ч

pH		Выход, %	Степень замещения	Доля двуокисленных звеньев	M_w , кДа
в начале реакции	в конце реакции				
2.6	2.7	87.4	0.36	0.33	58.7
7.0	2.8	89.3	0.36	0.33	58.1
10.0	3.9	75.6	0.36	0.33	39.3
12.7	6.9	74.5	0.36	0.33	39.4

образовании связей С—Н одновременно внутри- или межмолекулярных полуацеталей.

Широкая полоса поглощения в области 3600–3100 см^{-1} относится к валентным колебаниям гидроксильных групп, включенных в водородные связи разной прочности. Низкочастотная область полосы ν_{OH} характеризует гидроксильные группы, образующие более сильные водородные связи; высокочастотная — более слабые (рис. 3, *a*). С увеличением степени окисления максимум поглощения ν_{OH} смещается в сторону более высоких значений волновых чисел, т. е. наблюдается постепенное повышение содержания гидроксильных групп, связанных более слабыми водородными связями. Очевидно, включение альдегидных групп в состав макромолекул декстрана,

сопровожающееся раскрытием D-гликопиранозных колец и уменьшением количества гидроксильных групп в составе полисахарида, приводит к перераспределению системы водородных связей между гидроксильными группами.

В результате окисления происходит уменьшение индекса симметрии (a/b) низко- (степень замещения <0.20) и высокозамещенных (степень замещения >1.24) образцов по сравнению с немодифицированным декстраном, что характеризует их как статистически наименее однородные продукты реакции (табл. 4). Наиболее высоким индексом симметрии водородных связей полосы OH-групп характеризуются образцы диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.40–0.80, что позволяет оха-

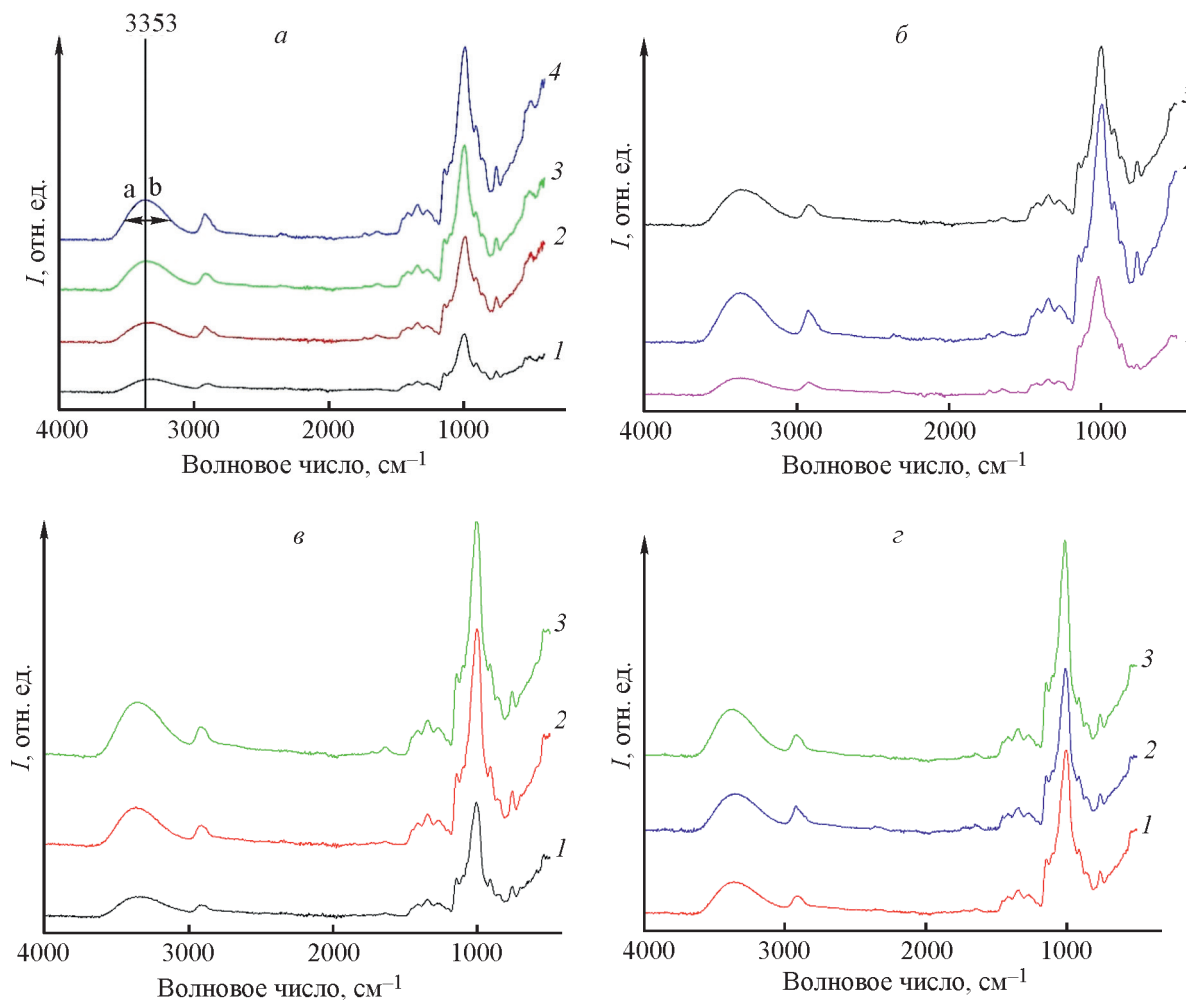


Рис. 3. ИК-спектры исходного декстрана и продуктов его окисления.

a — время окисления (мин): 1 — 5, 2 — 60, 3 — 180; 4 — исходный декстран (NaIO_4 :D-гликопиранозное звено = 0.24 моль:моль, $T = 20^\circ\text{C}$); *b* — состав реакционной смеси NaIO_4 :D-гликопиранозное (моль:моль): 1 — 0.06, 2 — 0.24, 3 — 0.96 (время реакции 1 ч, $T = 20^\circ\text{C}$); *v* — температура ($^\circ\text{C}$): 1 — 0.5, 2 — 10, 3 — 30 (NaIO_4 :D-гликопиранозное звено = 0.24 моль:моль, время реакции 1 ч); *z* — pH реакционной смеси: 1 — 2.8, 2 — 3.9, 3 — 6.9 (NaIO_4 :D-гликопиранозное звено = 0.24 моль:моль, время реакции 1 ч, $T = 20^\circ\text{C}$).

Таблица 4

Характеристика полосы поглощения гидроксильных групп в ИК-спектрах диальдегиддекстрана

Степень замещения	Индекс симметрии a/b	Положение максимума ν_{OH} , см^{-1}	$\Delta\nu_{OH}$, см^{-1}
Исходный декстран	0.88	3316	
0.10	0.55	3374	58
0.20	0.63	3375	59
0.40	0.78	3366	50
0.82	0.86	3362	46
1.24	0.50	3393	80

рактизовать их как наиболее однородные продукты окисления.

В процессе растворения диальдегиддекстрана можно выделить медленную (начальную) и быструю стадии процесса растворения; продолжительность начальной стадии увеличивается по мере роста в образцах количества альдегидных групп (рис. 4). Приведенные результаты могут свидетельствовать о том, что продолжительность растворения диальдегиддекстрана с разным содержанием альдегидных групп определяется не столько молекулярно-массовым распределением и однородностью их состава, сколько доступностью удельной внутренней поверхности лиофильно высушенных образцов для молекул воды.

Следует отметить, что при фиксированной степени замещения образцов диальдегиддекстрана скорость растворения зависит от значения pH реакци-

онного раствора: продолжительность растворения диальдегиддекстранов, полученных в реакционной среде с pH 6.9, в отличие от образцов, полученных в слабокислой среде, сопоставима с длительностью растворения декстрана и составляет 2–3 мин.

Анализ закономерностей кинетики гидролиза окисленного и исходного декстрана в течение 21 сут показал, что в начальный период времени скорость реакции гидролиза максимальна, затем наблюдается замедление процесса и достигается предельное значение молекулярной массы, которое зависит от степени замещения диальдегиддекстрана, pH буферного раствора (рис. 5). Следует отметить, что двустадийный характер гидролиза является типичным не только для диальдегиддекстрана, но и для некоторых других полисахаридов, таких как крахмал, пектин, монокарбоксилцеллюлоза.

При значении pH буферного раствора 2.0 скорость и глубина гидролиза зависят от содержания в образцах альдегидных групп и увеличиваются по мере роста степени замещения (рис. 5). Время полудеградаци ($T_{50\%}$) для образцов диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.16 составляет 21 сут, со степенью замещения 0.30 и 0.82 — 14 и 7 сут соответственно.

Наиболее интенсивно процесс химического гидролиза образцов диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.16–0.82 протекает в фосфатном буферном растворе с pH 7.4, при этом скорость реакции практически не зависит от содержания альдегидных групп. Выдерживание образцов диальдегиддекстрана с разным содержанием альдегидных групп в фосфатном буферном растворе в течение 3–14 сут приводит к образованию олигосахаридов (рис. 5). При этом значение $T_{50\%}$ образцов диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.16–0.82 варьируется в интервале 1.5–2 сут.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее устойчивы образцы диальдегиддекстрана

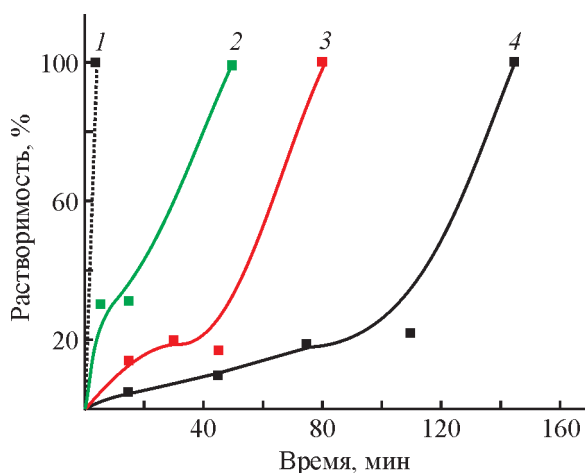


Рис. 4. Зависимость растворимости исходного (1) и окисленного (2–4) декстрана от времени.

Условия реакции окисления: pH 2.7, время реакции 1 ч, $T = 20^\circ\text{C}$.

Степень замещения декстрана: 2 — 0.16, 3 — 0.30, 4 — 0.82.

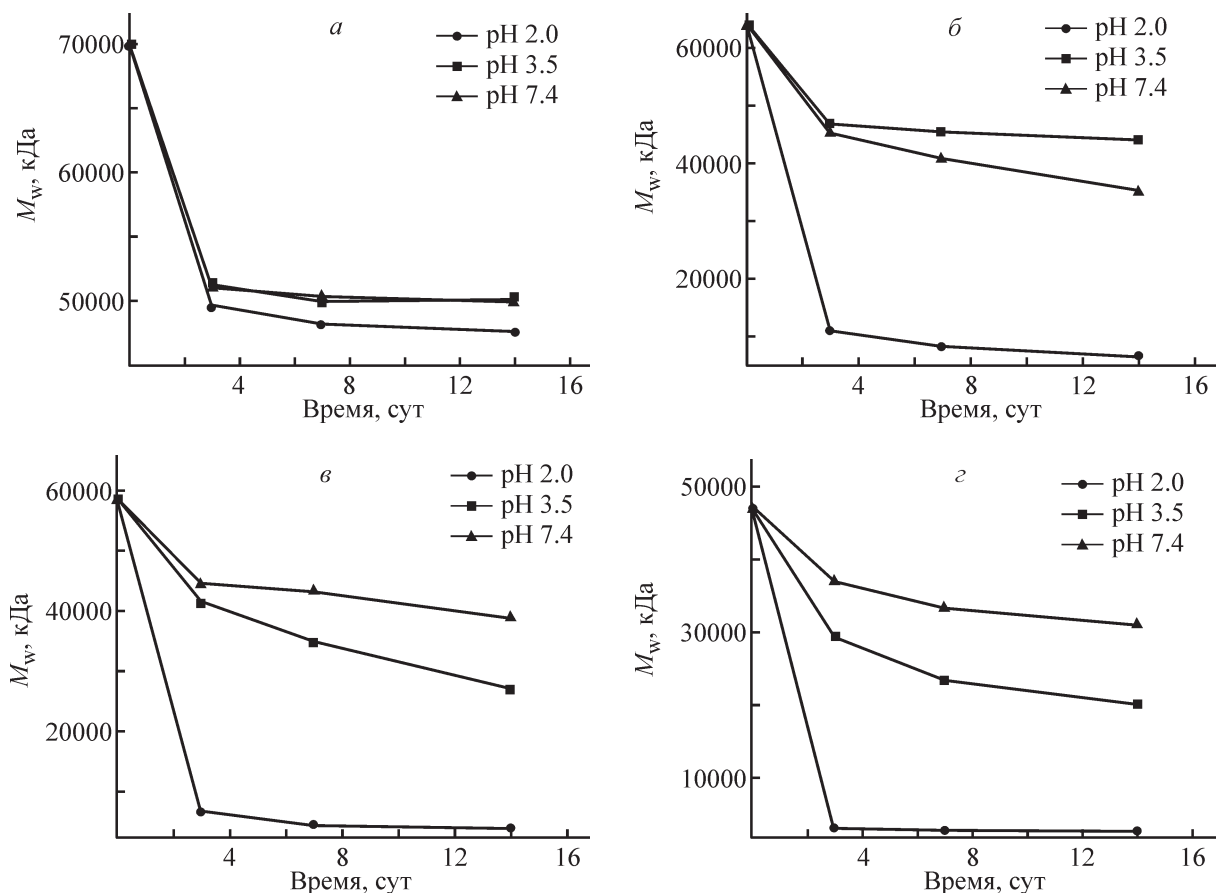


Рис. 5. Изменение среднемассовой молекулярной массы исходного (а) и окисленного (б–г) декстрана в зависимости от времени хранения в буферных растворах с различным значением рН.

Степень замещения: б — 0.16, в — 0.30, г — 0.82.

в слабокислом буферном растворе (рН 3.5): их степень гидролиза, достигнутая за 21 сут, не зависит от содержания альдегидных групп, сопоставима со степенью гидролиза исходного декстрана и не превышает 30%.

Выводы

При окислении декстрана в интервале отношения $0.20 < \text{NaIO}_4:\text{ГПЗ} < 0.96$ (моль:моль) образуются одно- и двуокисленные звенья, при этом основным фактором, влияющим на соотношение количества окисленных фрагментов в составе диальдегиддекстрана, является концентрация окислителя. Образцы диальдегиддекстрана со степенью замещения 0.36–0.82 характеризуются наиболее равномерным распределением альдегидных групп по длине макромолекул и незначительным понижением молекулярной массы по сравнению с исходным полисахаридом.

Установлен двустадийный характер процесса химического гидролиза образцов диальдегиддекстрана в буферных растворах с различными значениями

рН. Показано, что в зависимости от рН буферных растворов степень гидролиза диальдегиддекстрана с фиксированным содержанием альдегидных групп увеличивается в следующей последовательности: $3.5 < 2.0 < 7.4$.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках задания 2.2.02.01 ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия», 2021–2025 гг.

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

Т. Л. Юрkitович, Н. В. Голуб, Р. И. Костерова — получение образцов окисленного декстрана, опре-

деление его степени замещения; Ю. И. Пристромова — получение образцов окисленного декстрана, проведение анализа методом ИК-спектроскопии; С. О. Соломевич — определение молекулярной массы декстрана и диальдегиддекстранов.

Информация об авторах

Юркишович Татьяна Лукинична, к.х.н., доцент
Scopus: Id 6603891804
Голуб Наталья Васильевна, к.х.н.
Scopus: Id 7004652125
Пристромова Юлия Игоревна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6784-0088>
Соломевич Сергей Олегович, к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9053-4855>
Костерова Раиса Ивановна
Scopus: Id 6507078364

Список литературы

- [1] *Maia J., Evangelista M. B., Gil H., Ferreira L.* Dextran-based materials for biomedical applications // *Carbohydrates Applications in Medicine* / Ed. M. H. Gil. Karella, India: Research Signpost, 2014. P. 31–53.
- [2] *Togo A., Enomoto Y., Takemura A., Iwata T.* Synthesis and characterization of dextran ester derivatives and their adhesive properties // *J. Wood Sci.* 2019. V. 65. ID 66. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1845-x>
- [3] *Chandel A. K. S., Nutan B., Raval I. H., Jewrajka S. K.* Self-assembly of partially alkylated dextran-graft-poly[(2-dimethylamino)ethyl methacrylate] copolymer facilitating hydrophobic/hydrophilic drug delivery and improving conetwork hydrogel properties // *Biomacromolecules.* 2018. V. 19. N 4. P. 1142–1153. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b00015>
- [4] *Ciobanu C. S., Iconaru S. L., Gyorgy E., Radu M., Costache M., Dinischiotu A., Predoi D.* Biomedical properties and preparation of iron oxide-dextran nanostructures by MAPLE technique // *Chem. Cent. J.* 2012. V. 6. ID 17. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-17>
- [5] *Luana C. A., Ribovski L., Lins P. M. P., Zucolotto V.* The amount of dextran in PLGA nanocarriers modulates protein corona and promotes cell membrane damage // *J. Mater. Chem. B.* 2022. V.10. P. 8282–8294. <https://doi.org/10.1039/D2TB01296K>
- [6] *Wasiak I., Kulikowska A., Janczewska M., Magdalena M., Cymerman I. A., Nagalski A., Peter K., Szymanski W., Tomasz C.* Dextran nanoparticle synthesis and properties // *PLoS ONE.* 2016. V. 11. N 1. ID e0146237 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146237>
- [7] *Chimpibul W., Nagashima T., Hayashi F., Nakajima N., Hyon S. H., Matsumura K.* Dextran oxidized by a malaprade reaction shows main chain scission through a maillard reaction triggered by schiff base formation between aldehydes and amines // *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 2016. V. 54. N 14. P. 2254–2260. <https://doi.org/10.1002/pola.28099>
- [8] *Berillo D., Volkova N.* Preparation and physicochemical characteristics of cryogel based on gelatin and oxidised dextran // *J. Mater. Sci.* 2014. V. 49. P. 4855–4868. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8186-3>
- [9] *Pan J., Yuan L., Guo Ch., Geng X., Fei T., Fan W., Li Sh., Yuan H., Yan Z., Mo X.* Fabrication of modified dextran–gelatin in situ forming hydrogel and application in cartilage tissue engineering // *J. Mater. Chem. B.* 2014. V. 2. P. 8346–8360. <https://doi.org/10.1039/C4TB01221F>
- [10] *Zhao H., Heindel N. D.* Determination of degree of substitution of formyl groups in polyaldehyde dextran by the hydroaldehyde dextran by hydroxylamine hydrochloride method // *Pharm. Res.* 1991. V 8. N 3. P. 400–402. <https://doi.org/10.1023/a:1015866104055>
- [11] *Бутрим С. М., Бильдюкевич Т. Д., Бутрим Н. С., Юркишович Т. Л.* Изучение гетерогенного процесса О-нитрования карбоксилкрахмала // *ЖПХ.* 2002. Т. 75. № 8. С. 1346–1350. EDN: ULXVKL [*Butrim S. M., Bil'dyukevich T. D., Butrim N. S., Yurkshovich T. L.* Heterogeneous O-nitration of carboxy starch // *Russ. J. Appl. Chem.* 2002. V. 75. N 8. P. 1320–1324. <https://doi.org/1070-4272/02/7508-1320>].
- [12] *Maia J., Carvalho R. A., Coelho J. F., Simões P. N., Gil M. H.* Insight on the periodate oxidation of dextran and its structural vicissitudes // *Polymer.* 2011. V. 52. N 2. P. 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.11.058>
- [13] *Ishak M. F., Painter T.* Kinetic evidence for hemiacetal formation during oxidation of dextran in aqueous periodate // *Carbohydr. Res.* 1978. V. 64. P. 189–197.
- [14] *Жбанков П. Г.* Инфракрасные спектры и структура углеводов. Минск: Наука и техника, 1972. С. 131–132.