

Оригинальная статья / Original article

УДК 544.777

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-244-250>



## Анализ степени ветвления амилопектина и содержания амилозы в картофельных крахмалах по данным микрокалориметрии

© Ю.И. Матвеев\*, Е.В. Аверьянова\*\*

\* Институт биохимической физики им. Н.М. Эммануэля РАН,  
г. Москва, Российская Федерация

\*\* Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Бийск, Российская Федерация

**Резюме:** Гидроксиэтилированные крахмалы представляют определенный интерес для использования в инфузионной терапии благодаря высокому волемическому эффекту, продолжительность которого зависит от времени циркуляции препарата в крови: чем выше концентрация, молекулярный вес и степень замещения полимера, тем больше и продолжительней увеличивается объем циркулирующей крови. При этом известно, что гидроксиэтилированные крахмалы отличаются большим диапазоном молекулярного веса и степени замещения, что позволяет их растворам длительное время (до 10 ч) циркулировать в кровяном русле без утечки активного вещества в интерстиции жизненно важных органов. Показано, что зависимость температуры плавления кристаллической ламели крахмала от числа глюкозных остатков можно описать с помощью модифицированного соотношения Фокса – Лошаека, которое учитывает степень разветвления молекул амилопектина и содержание амилозы в крахмале. Предложено аналитическое выражение для оценки степени ветвления амилопектина картофельных крахмалов по данным микрокалориметрии. Полученные выражения позволяют отобрать те генотипы картофеля, у которых амилопектин имеет наиболее высокую степень ветвления, а крахмал содержит минимальное количество амилозы. Крахмалы таких сортов картофеля могут быть использованы при изготовлении заменителей плазмы крови – гидроксиэтилированных крахмалов, обладающих хорошими фармакодинамическими свойствами. В рамках развиваемого подхода можно определить влияние степени замещения на термодинамические свойства исследуемых крахмалов через изменение температуры плавления ламели  $T_m$  и таким образом оценить основные параметры, определяющие фармакодинамику замещенных крахмалов.

**Ключевые слова:** амилоза, амилопектин, крахмал, генотип картофеля, степень ветвления, термодинамические параметры, микрокалориметрия

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (мнемокод 0611-2020-013, номер темы – FZMM-2020-0013, ГЗ № 075-00316-20-01).

**Для цитирования:** Матвеев Ю.И., Аверьянова Е.В. Анализ степени ветвления амилопектина и содержания амилозы в картофельных крахмалах по данным микрокалориметрии. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. N 2. С. 244–250. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-244-250>

## Microcalorimetric investigation of amylopectin branching and the content of amylose in potato starches

Yuri I. Matveev\*, Elena V. Averyanova\*\*

\* N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS,  
Moscow, Russian Federation

\*\* Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University,  
Biysk, Russian Federation

**Abstract:** Hydroxyethylated starches are of particular interest for applications in infusion therapy because of their high volemic effect. The duration of this effect depends on the circulation time of the drug in the blood, i.e., the volume of circulating blood increases with an increase in the concentration, molecular weight and degree of polymer substitution. It is known that hydroxyethylated starches have a wide range of molecular weight and degree of substitution. This allows their solutions to circulate for a long time (up to 10 hours) in the bloodstream without leakage of the active substance into the interstitium of vital organs. The dependence of the melting point of the crystalline starch lamella on the number of glucose residues can be described using the modified Fox – Loshaek ratio, which takes into account the degree of branching of amylopectin molecules and the content of amylose in starch. We proposed an analytical expression for the evaluation of the degree of branching of amylopectin from potato starch based on microcalorimetric data. The proposed methodology allows the genotypes of potatoes with the highest degree of amylopectin branching and a minimum quantity of amylose in starch to be selected. Starches of such potato varieties can be used in the blood plasma substitutes production - hydroxyethylated starches that have good pharmacodynamic properties. Within the developed approach, it is possible to determine the effect of the degree of substitution on the thermodynamic properties of the studied starches through a change in the melting temperature of the lamella,  $T_m$ , hence estimating the main pharmacodynamic parameters of substituted starches.

**Keywords:** amylose, amylopectin, starch, potato genotype, branching degree, thermodynamic parameters, microcalorimetry

**Acknowledgments:** This work was supported by the project 075-00316-20-01 (FZMMM-2020-0013, mnemonic code 0611-2020-013) from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**For citation:** Matveev Yul, Averyanova EV. Microcalorimetric investigation of amylopectin branching and the content of amylose in potato starches. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):244–250. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-244-250>

## ВВЕДЕНИЕ

В клинической практике широко применяются кровезаменители на основе гидроксиэтилированного крахмала (ГЭК) [1–3], получаемого либо из амилопектинового крахмала восковидной кукурузы *Zea mays convar. Ceratina*, либо восковидного картофеля *Solanum ajanhuri*. [4]

Амилопектин – разветвленный полимер крахмала, содержащийся в различных природных источниках, может отличаться степенью разветвления. Степень разветвления (degree of branching, DB) – доля остатков глюкозы при разветвлении к общему числу остатков глюкозы в амилопектине. Другая, не менее важная характеристика ГЭК, – степень замещения (СЗ), которая показывает долю замещенных гидроксиэтильной группой остатков глюкозы к их общему количеству. Тип

замещения определяют по отношению С-2/С-6, которое указывает позицию гидроксиэтильной группы в молекуле глюкозы: чем выше отношение, тем медленнее распад ГЭК. Молярное замещение, молекулярная масса и отношение С-2/С-6 – основные параметры, определяющие фармакодинамику ГЭК [5]. Молекулярная масса ГЭК *in vivo* определяет его коллоидную активность [6]. Таким образом, при выведении новых сортов картофеля для получения ГЭК существенную роль играют значения DB и СЗ.

В работе [7] исследовано влияние генотипа картофеля и условий его роста на термодинамические характеристики крахмала – температуру плавления,  $T_m$ , и значение кооперативной единицы плавления,  $v$ , кристаллической ламеллы картофельных крахмалов (табл. 1).

**Таблица 1.** Термодинамические параметры плавления кристаллической ламеллы крахмалов из клубней нетрансформированного (*WT*) и трансгенного (*D12*) растений, культивируемых *in vitro* (I) и *in vivo* (II)

**Table 1.** Thermodynamic parameters of melting of crystalline lamella of starches from tubers of untransformed (*WT*) and transgenic (*D12*) plants cultivated *in vitro* (I) and *in vivo* (II)

Генотип картофеля	Условия культивирования	$(T_m)_{exp}$ , К	$(T_m)_{cal}$ , К	$v$ , отн. ед.	$L_{F-L}$
<i>WT</i>	I	338,9±0,2	338,8	14,5±0,3	-4,4
	II	342,8±0,0	342,7	10,9±2,1	
<i>D12</i>	I	341,4±0,1	335,5	7,0±0,1	-8,4
	II	344,5±0,3	340,3	13,5±0,4	

Полученная зависимость  $T_m$  от  $v$  может быть описана аналитически. Однако соотношение Фокса – Флори

$$T_g = T_{g(\infty)} - k/M, \quad (1)$$

которое широко используется для описания зависимости температуры стеклования полимера  $T_g$  от молекулярного веса макромолекулы  $M$  (степени полимеризации) [8], не всегда правильно описывает экспериментальные данные при малых молекулярных весах. В случае олигомеров, когда степень полимеризации приближается к 10, наблюдаются отклонения от зависимости (1). На это явление обратили внимание еще Фокс и Лошаек в работе [9], где они вместо выражения (1) предложили следующую зависимость:

$$T_g = T_{g(\infty)} - K^*/(M+M^*). \quad (2)$$

Соотношение (2) хорошо описывает температуру стеклования  $T_g$  олигомеров или структур, возникающих при синтезе макромолекул, например, ламелей, образующихся при синтезе амилопектина. Однако соотношение в той форме, как оно представлено, требует знания величин  $K^*$  и  $M^*$ , которые для олигомеров различного класса будут отличаться друг от друга. Последнее связано с тем, что на температуру стеклования (плавления) полимера существенное влияние начинают оказывать химическое строение концевых групп цепи [10] и ряд других факторов, в частности, разветвления полимерных цепей, содержание амилозы и др.

В настоящей работе показано, что зависимость температуры плавления кристаллической ламели крахмала  $T_m$  от числа гликозидных остатков  $v$  можно описать с помощью модифицированного соотношения Фокса – Лошаека, которое учитывает  $DB$  молекул амилопектина и содержание амилозы. Обычно для этих целей используют несколько методов: высокотемпературная  $^1H$  ЯМР-спектроскопия и высокоэффективная жидкостная хроматография [11], потенциометрическое титрование йодом, на данные которых мы будем ориентироваться в дальнейших оценках. Предложенный подход может быть использован для анализа указанных выше величин по данным микрокалориметрии в процессе генетического эксперимента по модификации картофеля.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе рассмотрены закономерности влияния степени замещения на термодинамические свойства крахмалов, выделенных из полученных ранее в Институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН (г. Москва, Россия) и описанных в [7], генотипов картофеля

(*Solanum tuberosum* L., сорт Дезире), различающихся соотношением фракций амилозы и амилопектина: *WT* образец нетрансформированного дикого картофеля и его генотипы с экспрессирующими генами *rolB* и *rolC* из *Agrobacterium rhizogenes*; две линии *AtPHYB* растений: Дара5 (*D5*) и Дара12 (*D12*), выращенных на агаризованной среде *in vitro* (I) и в почве *in vivo* (II).

Термодинамические параметры плавления 0,3%-х водных дисперсий крахмалов определены с помощью высокочувствительной дифференциальной сканирующей микрокалориметрии (ДСК) на микрокалориметре ДАСМ-4.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Аналитическое описание зависимости  $T_m$  ламелей от числа глюкозных остатков. Воспользуемся соотношением Фокса – Лошаека (2) для описания зависимости  $T_m$  генотипов картофеля, приведенных в табл. 1, от числа глюкозных остатков  $v$ . Так как между  $T_g$  и  $T_m$  существует определенное соотношение, которое зависит от степени упаковки полимера [12], то соотношение (2) можно записать следующим образом:

$$T_m = T_{m(\infty)} - L_{F-L}/(v + v^*). \quad (3)$$

Пусть  $T_m(v^*)$  и  $v^*$  – температура плавления и степень полимеризации ламели, выше которых  $T_m$  как функция от  $v$  описывается соотношением Флори – Фокса, а значения  $T_m(v^*)$  и  $v^*$  не зависят от химического строения концевых групп. Тогда зависимость (3) можно записать следующим образом:

$$T_m = T_m(v^*) - L_{F-L} [(v + v^*)^{-1} - (2v^*)^{-1}]. \quad (4)$$

Для определения параметров  $L_{F-L}$  и  $v^*$  уравнения (4) воспользуемся данными для генотипов картофеля *WT* и *D12* [7] при разных условиях роста:

$$\Delta T_m = (T_m)_{II} - (T_m)_I = L_{F-L} (-1/(v_{II} + v^*) + 1/(v_I + v^*)) - \text{для } WT, \quad (5)$$

$$\Delta T_m = (T_m)_{II} - (T_m)_I = L_{F-L} (-1/(v_{II} + v^*) + 1/(v_I + v^*)) - \text{для } D12. \quad (6)$$

Полагая, что  $L_{F-L}$  и  $v^*$  одинаковы в уравнениях (5) и (6), найдем  $v^* = -9,85$  и  $L_{F-L} = -4,4$ . В дальнейшем будем считать, что  $v^*$  постоянна ( $v^* = -10$ ) для рассматриваемых типов картофельных крахмалов, а соответствующее ей значение  $T_m(v^*) = 338$  К. Тогда значения  $L_{F-L}$  можно найти из выражений (5) и (6), подставляя найденные экспериментальным путем значения  $\Delta T_m$ ,  $v_{II}$  и  $v_I$ . В табл. 1 приведены вычисленные таким образом значения  $L_{F-L}$  для *WT* и *D12*.

Уравнение Фокса – Лошаека хорошо описывает зависимость  $T_m$  от  $v$  для генотипов *WT* и

rolB, характер поведения  $T_m$  от  $v$  у D12, но дает большие погрешности при определении температур плавления других генотипов. Последнее связано с тем, что зависимость  $T_m$  от  $v$  в области  $v^*$  имеет более сложный характер, чем это описывается исходным уравнением (3).

Связь коэффициента  $L_{F-L}$  с параметрами генотипа картофеля. В работе [13] показано, что  $k$  в уравнении (1) пропорционально критической степени полимеризации  $N_c$ , которая в свою очередь пропорциональна кубическому корню из объема повторяющегося звена полимера и  $T_{g(\infty)}$  [14]. Полагая, что коэффициент  $L_{F-L}$  имеет такую же структуру, только вместо  $T_{g(\infty)}$  будет  $T_m(v^*)$ , значение  $L_{F-L}$  будет пропорционально либо  $(\Delta V_{eg})^{1/3}$ , либо  $(\Delta V_{gr})^{1/3}$ , где  $\Delta V_{eg}$  и  $\Delta V_{gr}$  – ван-дер-ваальсовы объемы концевых групп и гликозидного остатка соответственно.

Пусть у генотипа WT  $\Delta V_{eg} = \Delta V_{gr}$ . Тогда, зная  $L_{F-L}$  для каждого генотипа картофеля, можно вычислить  $\Delta V_{eg}/\Delta V_{gr}$ . Вычисления показывают, что для некоторых генотипов картофеля, например, rolC, относительные объемы концевых групп имеют бессмысленно большое значение, поэтому в дальнейших оценках будем полагать, что концевые группы у всех генотипов картофеля имеют одинаковый объем, а различие в коэффициентах  $L_{F-L}$  определяется числом ответвлений и числом звеньев ламели.

Влияние ветвления амилопектина на коэффициент  $L_{F-L}$ . Так как амилопектин относится к классу высоковетвленных полимеров древовидного типа, на его температуру плавления должны влиять число ответвлений и количество звеньев образующих ламели. В зависимости от генотипа фермента, влияющего на ветвление молекулы амилопектина при его синтезе, зависимость температуры стеклования амилопектина от числа звеньев, образующих ламели, будет меняться. В качестве такой зависимости примем выражение из работ [10, 15], в которых рассмотрен разветвленный полиэтилен (ПЭ) с трехфункциональными узлами. Полагая, что в случае амилопектина влияние ветвлений на температуру стеклования/плавления описывается выражением подобного типа, запишем коэффициент Фокса – Лошаака  $L_{F-L}$  в виде функции

$$L_{F-L} = L_o \frac{v+a}{v-b} \quad (7)$$

и определим коэффициенты  $L_o$ ,  $a$  и  $b$ . Для этого преобразуем выражение (7) к следующему виду:

$$L_{F-L} = L_o \left( 1 + \frac{a+b}{v-b} \right). \quad (8)$$

Полагая, как и в работе [15], что  $v \gg b$  и пренебрегая членом  $b/v$  как величиной более высо-

кого порядка малости, выражение (8) окончательно примет вид

$$L_{F-L} = L_o \left( 1 + \frac{A}{v} \right), \quad (9)$$

где  $A = a + b$ .

Величины  $L_o$  и  $A$  оценим по значениям  $L_{F-L}$  и  $v$  для генотипов WT и D12. При этом значения  $v$  соответствуют условиям роста II (см. табл. 1). В случае генотипа WT найденные значения будут равны:  $L_o = -27,17$  и  $A = -9,37$ .

В дальнейшем будем считать, что  $L_o$  – константа, одинаковая для всех генотипов, а коэффициент  $A$  связан со степенью разветвления (DB) амилопектина. Допустим, что эта связь имеет линейный характер, т.е.  $A = A_o \cdot DB$ . По данным высокотемпературной  $^1H$  ЯМР-спектроскопии [11], величина  $\langle DB \rangle = 0,05$  мольных долей для картофельных крахмалов. Полагая, что  $DB = 0,05$  имеет генотип WT, найдем константу  $A_o$ , она будет равна -187.

Из соотношений (4) и (9) для  $T_m$  и  $L_{F-L}$  можно получить выражение для вычисления DB по данным калориметрии ( $T_m$  и  $v$ ):

$$DB = \frac{v}{187} \left[ 1 - \frac{T_m - 338}{24.17[(v-10)^{-1} + 0.05]} \right]. \quad (11)$$

В табл. 2 приведены результаты вычислений DB по формуле (11) для различных генотипов картофеля при разных условиях роста. Если в условиях I у генотипов WT, D5 и rolB DB меняется в 1,45 раза, то в случае генотипов D12 и rolC DB меняется в 14,8 раз. Отсюда такое различие в форме и размере клубней, особенно у генотипа rolC [7]. В случае условий роста II (*in vivo*) DB оказывается меньше, чем в случае условий роста I (*in vitro*).

По данным расчетов DB можно определить, какой из генотипов содержит наибольшее количество амилопектина в условиях *in vitro* (I) и *in vivo* (II). Таким генотипом является rolB. Последнее подтверждается данными измерений вязкости для 5%-х водных дисперсий картофельных крахмалов [7]. Вязкость rolB оказалась выше, чем у других генотипов.

Известно, что увеличение содержания амилозы в крахмале приводит к уменьшению DB [16]. Разница между DB *in vitro* и *in vivo* связана с тем, что при способе культивирования *in vivo* образуется больше амилозы, которая понижает значение DB. Зависимость DB от концентрации амилозы  $C_A$  можно записать следующим образом:

$$DB = DB_{max}(1 - \xi \cdot C_A). \quad (12)$$

**Таблица 2.** Зависимость  $DB$  и  $C_A$  от характеристик крахмала и условий культивирования для различных генотипов картофеля

**Table 2.** Dependence of  $DB$  and  $C_A$  on starch characteristics and cultivation conditions for different potato genotypes

Генотип картофеля	Условия культивирования	$(T_m)_{exp}$ , К	$v$ , отн. ед.	$DB \cdot 10^2$	$C_A$
<i>WT</i>	I	338,9±0,2	14,5±0,3	6,68	0,06
	II	342,8±0,0	10,9±2,1	4,82	0,26
<i>D5</i>	I	340,7±0,0	12,5±0,1	5,03	0,24
	II	341,4±0,1	7,0±0,1	5,60	0,18
<i>D12</i>	I	344,5±0,3	13,5±0,4	1,43	0,62
	II	337,9±0,1	13,5±0,3	7,31	0
<i>rolB</i>	I	341,7±0,0	11,2±1,3	4,95	0,25
	II	342,1±0,2	17,9±0,2	0,38	0,73

Возьмем в качестве  $DB_{max}$  значение  $DB = 0,073$  для генотипа *rolB* *in vitro*, а  $\xi$  определим из условия, что *in vivo*  $C_A = 0,25$  (обычное содержание амилозы в картофельном крахмале [11]). Тогда  $\xi = 1,3$ . В табл. 2 представлены значения  $C_A$  для крахмалов различного типа, вычисленные с помощью выражения (12). Если генотипы *WT* и *rolB* можно отнести к крахмалам обычного типа по содержанию амилозы, то генотип *D12* можно отнести к высокоамилозным (high-amylose) крахмалам, у которых  $C_A$  меняется от 0,45 до 0,69.

Обычно в ГЭК восковидного картофеля содержится около 21% амилозы. Соответственно его  $DB_{ГЭК} = 0,053$ . Так как у восковидной кукурузы  $DB$  в 1,32 раза больше, чем у картофеля [12], то ее  $DB_{ГЭК} = 0,07$ , а концентрация амилозы  $C_A = 3\%$  (у восковидной кукурузы  $C_A$  обычно меняется от 1,5 до 3,0%<sup>1</sup>).

Таким образом, с помощью выражений (11) и (12) по данным калориметрии можно определить степень разветвления и содержание амилозы в нормальных и амилопектиновых картофельных крахмалах, которые широко используются при изготовлении заменителей плазмы крови ГЭК [11].

## ВЫВОДЫ

Влияние числа глюкозных остатков ламели на ее температуру плавления для рассмотренных генотипов картофеля может быть хорошо описано с помощью модифицированного соотношения Фокса – Лошаека. На основании полученного выражения (11) по данным калориметрии можно определить степень разветвления амилопектина, а с помощью выражения (12) оценить содержание амилозы в крахмалах картофеля различных генотипов.

Предложенный метод анализа может быть использован для контроля степени разветвления амилопектина выводимых новых генотипов картофеля по данным исследований в условиях *in vitro* и *in vivo*. Уже на стадии *in vitro* исследований можно определить генотипы картофеля, дающие крахмалы амилопектинового (*WT*, *rolB*) или амилозного (*rolC*) типа, а *in vivo* исследования помогут определить типы почв и их подкормки, наиболее благоприятные для выращивания картофеля с требуемой структурой крахмала.

В рамках развиваемого подхода можно определить влияние степени замещения на термодинамические свойства исследуемых крахмалов через изменение температуры плавления ламели  $T_m$  и таким образом оценить основные параметры, определяющие фармакодинамику ГЭК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халикова Е.Ю. Безопасность и эффективность использования препаратов гидроксиэтилкрахмала в программах инфузионной терапии // Трудный пациент. 2012. Т. 10. N 5. С. 22–29.
2. Пустовойт В.Л., Доброхотов Д.А., Нестерова Н.В. Гидроксиэтилкрахмал как альтернативный коллоидный кровезаменитель грубодисперсной природы в современной клинической практике // Open Innovation: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 23 апреля 2019 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 272–276.
3. Giordano G., Pugliese F., Bilotta F. Hydroxy ethyl starch and fluid challenge // European Journal of Anaesthesiology. 2020. Vol. 37. Issue 7. P. 611–621. <https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000001147>
4. Травень В.Ф., Панов А.В., Долотов С.М., Стрельникова Т.А., Суслов В.В., Гладырев В.В. Сравнительный анализ продуктов гидроксиэтилирования картофельного и кукурузного крахмалов методами газожидкостной хроматографии и ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии // Химия растительного сырья. 2009. Т. 3. С. 57–61
5. Сухотин С.К. Возможности плазмозамещающих растворов гидроксиэтилированного

<sup>1</sup>Yangcheng Hanyu. Characterization of normal and waxy corn starch for bioethanol production. Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University. 12748. 2012. 78 p. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-4856>

крахмала (ГЭК) в реаниматологии и хирургии. Рефортан®, Рефортан® плюс, Стабизол® // Дальневосточный медицинский журнал. 2001. N. S4. С. 68–72.

6. Omar M.N., Shouk T.A., Khaleq M.A. Activity of blood coagulation and fibrinolysis during and after hydroxyethyl starch (HES) colloidal volume replacement // *Clinical Biochemistry*. 1999. Vol. 32. Issue 4. P. 269–274. [https://doi.org/10.1016/s0009-9120\(99\)00014-4](https://doi.org/10.1016/s0009-9120(99)00014-4)

7. Вассерман Л.А., Кривандин А.В., Филатова А.Г., Васильев В.Г., Колачевская О.О., Тарасов В.Ф. [и др.]. Структурные и термодинамические характеристики крахмалов картофеля в зависимости от генотипа растений и условий их культивирования // *Химическая физика* 2020. Т. 39. N 6. С. 63–70. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2006014X>

8. Fox T.G., Flory P.J. Second-order transition temperatures and related properties of polystyrene. I. Influence of molecular weight // *Journal of Applied Physics*. 1950. Vol. 21. Issue 6. P. 581–591. <https://doi.org/10.1063/1.1699711>

9. Fox T.G., Loshaek S. Influence of molecular weight and degree of crosslinking on the specific volume and glass temperature of polymers // *Journal of Polymer Science*. 1955. Vol. 15. Issue 80. P. 371–390. <https://doi.org/10.1002/pol.1955.120158006>

10. Askadskii A.A. *Computational materials science of polymers*. United Kingdom: Cambridge International Science Publishing, 2003. 696 p.

11. Sommermeyer K., Cech F., Schossow R. Differences in chemical structures between waxy maize- and potato starch-based hydroxyethyl starch volume therapeutics // *Transfusion Alternatives in Transfusion Medicine*. 2007. Vol. 9. Issue 3. P. 127–133. <https://doi.org/10.1111/j.1778-428X.2007.00071.x>

12. Аскадский А.А., Слонимский Г.Л., Матвеев Ю.И., Коршак В.В. Упаковка макромолекул и температура стеклования полимеров / Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1976. Т. 18. N 9. С. 2067–2074.

13. Matveev Yu.I., Plashchina I.G. A dynamic model of the effect of methyl resorcinol on the enzymatic activity of lysozyme // *Polymer Science. Series A*. 2011. Vol. 53. Issue 5. P. 390–396. <https://doi.org/10.1134/S0965545X11050063>

14. Матвеев Ю.И., Аскадский А.А. Определение температуры перехода в вязкотекучее состояние полимеров // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1993. Т. 35. N 1. С. 63–67.

15. Askadskii A.A., Kovriga O.V. Effect of branching on the physical characteristics of polymers // *Polymer Science U.S.S.R.* 1991. Vol. 33. Issue 9. P. 1891–1831. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(91\)90019-M](https://doi.org/10.1016/0032-3950(91)90019-M)

16. Папахин А.А. Лукин Н.Д., Ананских В.В., Бородина З.М. О современных направлениях технологии гидролиза крахмала // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. N 12. С. 84–89. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-11214>

## REFERENCES

1. Khalikova E.Yu. Safety and efficacy of HES in infusion therapy programs. *Trudnyi patsient*. 2012;10(5):22–29. (In Russian)

2. Pustovoit VL, Dobrokhotov DA, Nesterova NV. Hydroxyethyl starch as an alternative colloidal blood substitute of the coarse nature of modern clinical practice. In: *Open Innovation: Trudy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Open Innovation: Proceedings of VIII International Scientific and Practical Conference*. Penza, 23 April 2019. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2019, pp. 272–276. (In Russian)

3. Giordano G, Pugliese F, Bilotta F. Hydroxyethyl starch and fluid challenge. *European Journal of Anaesthesiology*. 2020;37(7):611–621. <https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000001147>

4. Traven VF, Panov AV, Dolotov SM, Strelnikova TA, Suslov VV, Gladyshev VV. Comparative analysis of potato and corn starch hydroxyethylation products by gas-liquid chromatography and <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. *Khimija rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2009;3:57–61. (In Russian)

5. Sukhotin SK. Possibilities of plasma-substituting solutions of hydroxyethylated starch (HES) in resuscitation and surgery. Refortan®, Refortan® plus, Stabizol®. *Dal'nevostochnyi meditsinskii zhurnal*. 2001;S4:68–72. (In Russian)

6. Omar MN, Shouk TA, Khaleq MA. Activity of blood coagulation and fibrinolysis during and after hydroxyethyl starch (HES) colloidal volume replacement. *Clinical Biochemistry*. 1999;32(4):269–274. [https://doi.org/10.1016/s0009-9120\(99\)00014-4](https://doi.org/10.1016/s0009-9120(99)00014-4)

7. Wasserman LA, Krivandin AV, Filatova AG, Vasil'ev VG, Kolachevskaya OO, Tarasov VF, et al. Structural and thermodynamic characteristics of potato starches depending on the plant genotype and their cultivation conditions. *Chimicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*. 2020;39(6):63–70. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0207401X2006014X>

8. Fox TG, Flory PJ. Second-Order Transition Temperatures and Related Properties of Polystyrene. I. Influence of Molecular Weight. *Journal of Applied Physics*. 1950;21(6):581–591. <https://doi.org/10.1063/1.1699711>

9. Fox TG, Loshaek S. Influence of molecular weight and degree of crosslinking on the specific volume and glass temperature of polymers. *Journal of Polymer Science*. 1955;15(80):371–390. <https://doi.org/10.1002/pol.1955.120158006>

10. Askadskii AA. *Computational materials science of polymers*. United Kingdom: Cambridge International Science Publishing; 2003. 696 p.

11. Sommermeyer K, Cech F, Schossow R. Differences in chemical structures between waxy

maize- and potato starch-based hydroxyethyl starch volume therapeutics. *Transfusion Alternatives in Transfusion Medicine*. 2007;9(3):127–133. <https://doi.org/10.1111/j.1778-428X.2007.00071.x>

12. Askadskii AA, Slonimskii GL, Matveev Yul, Korshak VV. Macromolecule packaging and glass transition temperature of polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = Polymer Science. Series A*. 1976;18(9):2067–2074. (In Russian)

13. Matveev Yul, Plashchina IG. A dynamic model of the effect of methyl resorcinol on the enzymatic activity of lysozyme. *Polymer Science. Series A*. 2011;53(5):390–396. <https://doi.org/10.1134/S0965545X11050063>

14. Matveev Yul, Askadskii AA. Calculation of the temperature of polymer transition into the viscous flow state. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = Polymer Science. Series A*. 1993;35(1):63–67. (In Russian)

15. Askadskii AA, Kovriga OV. Effect of branching on the physical characteristics of polymers. *Polymer Science U.S.S.R.* 1991;33(9):1891–1831. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(91\)90019-M](https://doi.org/10.1016/0032-3950(91)90019-M)

16. Papakhin AA, Lukin ND, Ananskikh VV, Borodina ZM. Modern trends in starch hydrolysis technology. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2020;34(12):84–89. (In Russian) <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-11214>

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Матвеев Юрий Игнатьевич,**

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,  
Институт биохимической физики  
им. Н.М. Эммануэля РАН,  
117997, г. Москва, ул. Косыгина, 4,  
Российская Федерация,  
e-mail: [yu.matveev@mail.ru](mailto:yu.matveev@mail.ru)

##### **Аверьянова Елена Витальевна,**

к.х.н., доцент, доцент кафедры биотехнологии,  
Бийский технологический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»,  
659305, г. Бийск, ул. им. Героя Советского  
Союза Трофимова, 27,  
Российская Федерация,  
✉ e-mail: [averianova.ev@bti.secna.ru](mailto:averianova.ev@bti.secna.ru)

#### **Заявленный вклад авторов**

Авторы сделали эквивалентный вклад  
в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-  
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 09.02.2021.  
Одобрена после рецензирования 16.04.2021.  
Принята к публикации 31.05.2021.*

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Yuri I. Matveev,**

Cand. Sci. (Physics and Mathematics),  
Senior Scientist,  
N.M. Emanuel Institute of Biochemical  
Physics RAS,  
4, Kosygin St., Moscow, 117997,  
Russian Federation,  
e-mail: [yu.matveev@mail.ru](mailto:yu.matveev@mail.ru)

##### **Elena V. Averyanova,**

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Department of Biotechnology,  
Biysk Technological Institute (branch)  
of the Altay State Technical University,  
27, Geroi Sovetskogo Soyuza Trofimov St.,  
Biysk, 659305,  
Russian Federation,  
✉ e-mail: [averianova.ev@bti.secna.ru](mailto:averianova.ev@bti.secna.ru)

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests re-  
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved  
by all the co-authors.*

*The article was submitted 09.02.2021.  
Approved after reviewing 16.04.2021.  
Accepted for publication 31.05.2021.*