

УДК 664.2

Поступила в редакцию 06.02.2019
Received 06.02.2019¹М.С. Алексеенко, ²Н.М. Новикова, ¹В.В. Литвяк¹РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»,
г. Минск, Республика Беларусь²Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова Белорусского
государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ХОЛОДНОГО КИСЛОТНОГО ГИДРОЛИЗА КАРТОФЕЛЬНОГО И КУКУРУЗНОГО КРАХМАЛА

Аннотация. Температура, время гидролиза, тип и концентрация минеральной кислоты, а также концентрация крахмальной суспензии оказывали существенное влияние на физико-химические свойства (средний диаметр крахмальных гранул и условную вязкость). При повышении времени гидролиза с 2 до 6 ч, температуры с 30 до 50 °С, концентрации суспензии с 20 % до 40 % условная вязкость клейстера картофельного крахмала снижалась от более 1380 до 11,8, кукурузного от 470 с до 11,6 с при одновременном уменьшение среднего диаметра гранул картофельного крахмала от 46,4 мкм до 32,3 мкм, кукурузного от 35,2 мкм до 17,0 мкм. Соляная кислота оказывала большее по сравнению с серной кислотой воздействие на изменение структуры и свойств крахмала. При ужесточении режимов холодного гидролиза как картофельного, так и кукурузного крахмала (увеличении концентрации кислоты, температуры и времени гидролиза) наблюдалось уменьшение среднего размера крахмальных гранул при одновременном понижении условной вязкости крахмальных клейстеров. Наиболее интересными для применения технологическими режимами холодного кислотного гидролиза картофельного крахмала являются следующие: концентрация крахмальной суспензии – 40 %, температура гидролиза – 50 °С, время гидролиза – 6 ч, модифицирующий агент – соляная кислота, концентрация кислоты – 0,5 н. раствор, а кукурузного крахмала: концентрация крахмальной суспензии – 40 %, температура гидролиза – 50 °С, время гидролиза – 6 ч, модифицирующий агент – соляная кислота, концентрация кислоты – 0,5 н. раствор. Кислотного гидролизованые крахмалы с наименьшим средним размером крахмальных гранул и наименьшей условной вязкостью крахмальных клейстеров могут с успехом найти применение в пищевой промышленности при приготовлении сухих смесей киселей, а также в технических целях: при производстве гипскартонных изделий в качестве связующего, в качестве шликтующей основы при шликтовании хлопчатобумажных и смешанных нитей, а также при производстве стекловолокна в качестве основы замасливателей.

Ключевые слова: крахмал, картофельный, кукурузный, клейстер, условная вязкость, крахмальные гранулы, холодный гидролиз, минеральная кислота, температура, концентрация

M.S. Alekseenko¹, N.M. Novikova², V.V. Litvyak¹¹RUE «Scientific-Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus»,
Minsk, Republic of Belarus²Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Republic of Belarus

STUDY OF THE PECULIARITIES OF COLD ACID HYDROLYSIS OF POTATO AND CORN STARCH

Abstract. Temperature, hydrolysis time, type and concentration of mineral acid, as well as the concentration of starch suspension had a significant impact on the physicochemical properties (average diameter of starch granules and conditional viscosity). With increasing hydrolysis time from 2 to 6 hours, temperatures from 30 to 50 °C, suspension concentration from 20 % to 40 %, the conditional viscosity of potato starch paste decreased from more than 1380 to 11.8, corn from 470 s to 11.6 s, while reducing the average diameter of potato starch granules is from 46.4 microns to 32.3 microns, corn from 35.2 microns to 17.0 microns. Hydrochloric acid had a greater effect than changes in structure and properties of starch compared to sulfuric

acid. With the tightening of cold hydrolysis of both potato and corn starch (an increase in acid concentration, temperature and hydrolysis time), a decrease in the average size of starch granules was observed while simultaneously reducing the conditional viscosity of starch pastes. The most interesting technological regimes for application of cold acid hydrolysis of potato starch are the following: the concentration of starch suspension is 40 %, the hydrolysis temperature is 50 °C, the hydrolysis time is 6 hours, the modifying agent is hydrochloric acid, the acid concentration is 0,5 n. solution, and corn starch: the concentration of starch suspension is 40 %, the hydrolysis temperature is 50 °C, the hydrolysis time is 6 hours, the modifying agent is hydrochloric acid, the acid concentration is 0,5 n. solution. Acid hydrolyzed starch with the smallest average size of starch granules and the lowest relative viscosity of starch pastes can be successfully used in the food industry in the preparation of dry kissel mixtures, as well as for technical purposes: in the production of plasterboard products as a binder, as a dressing basis for dressing cotton mixed yarns, as well as in the production of fiberglass as the basis for sizing.

Keywords: starch, potato, corn, paste, conditional viscosity, starch granules, cold hydrolysis, mineral acid, temperature, concentration

Введение. Наиболее динамично развивающейся отраслью промышленности является крахмалопаточная. Фундаментальным и прикладным вопросам технологии крахмала и крахмалопродуктов посвящено огромное количество научных публикаций отечественных [1–13] и зарубежных исследователей [14–36].

Крахмалопаточная отрасль Республики Беларусь на 2018 г. включает около 15 предприятий по производству крахмала и крахмалопродуктов. Рентабельность отечественных производителей крахмала и крахмалопродуктов невысокая в результате устаревших технологий производства, низкого качества сырья, узкого ассортимента выпускаемой продукции и ряда других причин. Наибольшим спросом на рынке Беларуси и на мировых рынках пользуются не нативные, а модифицированные крахмалы. Модифицированные крахмалы широко применяются во многих отраслях пищевой промышленности: кондитерской, хлебопекарной, консервной, пищекокцентратной, молочной, мясной, а также в текстильной, бумажной, кожевенной, полиграфической, фармацевтической промышленности, в металлургии, в быту и т.д. Наиболее простой и востребованной модификацией является кислотногидролизованное крахмалы. В настоящее время в Республике Беларусь отсутствуют отечественные технологии кислотногидролиза крахмала, которые способны достойно конкурировать с зарубежными.

Одной из наиболее востребованных в настоящее время видов крахмалопродуктов является химически модифицированный кислотногидролизованное крахмал. В настоящее время актуальным является создание нового приоритетного научно-практического направления развития современного крахмального производства путем разработки технологии холодного гидролиза минеральными кислотами крахмала с сохранением крахмальных гранул и нахождении корреляционной зависимости между режимами гидролиза, размером крахмальных гранул, физико-химическими свойствами и возможностями применения кислотногидролизованного крахмала.

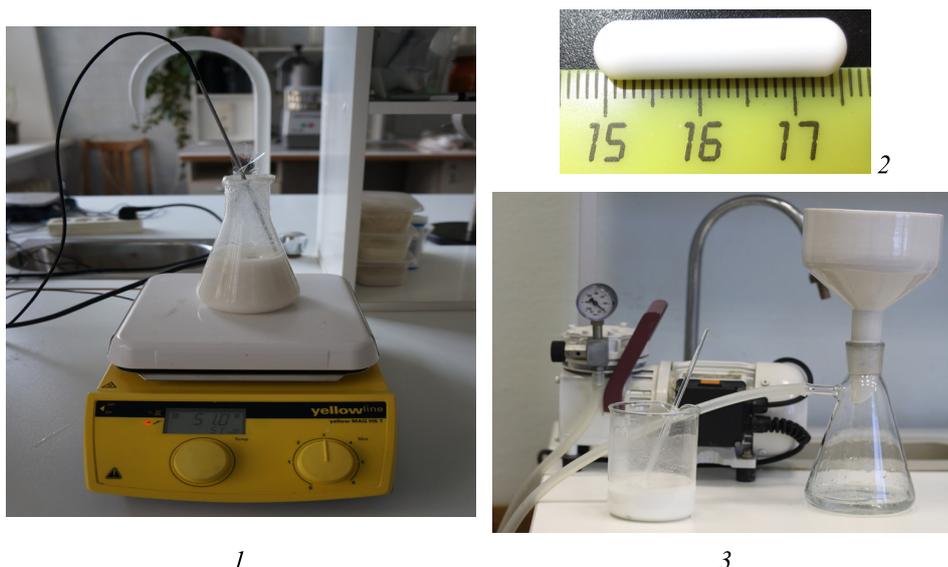
Целью исследования являлось установление параметров гидролиза для получения кислотногидролизованного крахмала.

Объект и методы исследования. *Объект исследования.* Объектом исследования являлись нативные и кислотногидролизованное картофельный и кукурузный крахмалы.

Метод лабораторного получения кислотногидролизованное крахмалов. Для проведения гидролиза крахмала в лабораторных условиях использовали магнитную мешалку с подогревом и термопарой YellowMAGHS 7, лабораторный вакуумный насос, шланги, стеклянную колбу Бунзена, фарфоровую воронку Бюхнера (рис. 1).

Основная матрица получения экспериментальных образцов кислотногидролизованного крахмала в лабораторных условиях представлена в табл. 1.

Кислотный гидролиз картофельного и кукурузного крахмала проводили при 30, 40 или 50 ± 3 °C в течение 2, 4 или 6 ч при использовании 0,1 н. и 0,5 н. водного раствора соляной (HCl) и серной кислот (H₂SO₄). Реакцию кислотногидролиза осуществляли следующим образом: навеску крахмала при перемешивании диспергировали в определенном объеме водного раствора кислоты (концентрация суспензии крахмала – 20, 30 или 40 %), затем термостатировали при фиксированной температуре, после чего через 2, 4, 6 ч отбирали порцию суспензии кислотногидролизованного крахмала, нейтрализовали 0,1 н. или 0,5 н. раствором гидроксида натрия (NaOH) до pH 5–7,5, затем кислотногидролизованное крахмал отделяли от раствора на стеклянном пористом фильтре под вакуумом, промывали его водой и сушили в сушильном шкафу при температуре 35 °C.



1 – магнитная мешалка с подогревом; 2 – магнит; 3 – лабораторный вакуумный насос

Рис. 1. Получение кислотного гидролизованного крахмала в лабораторных условиях
Fig. 1. Getting acid hydrolyzed starches in the laboratory

Методы физико-химических исследований. Условную вязкость 6 %-ого водного клейстера кукурузного крахмала измеряли на вискозиметре ВЗ-246 в соответствии с ТУ 190239501.889-2015.

Средний диаметр гранул картофельного крахмала измеряли при помощи электронного микроскопа LEO 1420 (Germany). Металлизацию препаратов осуществляли золотом в вакуумной установке EMITECH K 550X.

Результаты и их обсуждение. Нативный крахмал – природный полимер, в котором мономеры (остатки α-D-глюкопиранозы) связаны α-(1→4)- и α-(1→6)-глюкозидными связями, образуя амилозу (полисахарид линейного строения) и амилопектин (полисахарид разветвленного строения).

Т а б л и ц а 1. Матрица получения экспериментальных образцов кислотного гидролизованного крахмала в лабораторных условиях

Table 1. Matrix of obtaining experimental samples of acid-hydrolyzed starch in the laboratory

№ образца	Условия гидролиза		№ образца	Условия гидролиза	
картофельный крахмал, 0,5 н. р-р H ₂ SO ₄ , 6 ч.			картофельный крахмал, 0,5 н. р-р HCl, 6 ч.		
1.1	суспензия 20 %	t=30 °C	4.1	суспензия 20 %	t=30 °C
1.2		t=40 °C	4.2		t=40 °C
1.3		t=50 °C	4.3		t=50 °C
2.1	суспензия 30 %	t=30 °C	5.1	суспензия 30 %	t=30 °C
2.2		t=40 °C	5.2		t=40 °C
2.3		t=50 °C	5.3		t=50 °C
3.1	суспензия 40 %	t=30 °C	6.1	суспензия 40 %	t=30 °C
3.2		t=40 °C	6.2		t=40 °C
3.3		t=50 °C	6.3		t=50 °C
картофельный крахмал					
суспензия 40%, t=50 °C			суспензия 40%, t=50 °C		
7.1	0,1 н. р-р H ₂ SO ₄	2 ч.	9.1	0,5 н. р-р H ₂ SO ₄	2 ч.
7.2		4 ч.	9.2		4 ч.
7.3		6 ч.	9.3		6 ч.
8.1	0,1 н. р-р HCl	2 ч.	10.1	0,5 н. р-р HCl	2 ч.
8.2		4 ч.	10.2		4 ч.
8.3		6 ч.	10.3		6 ч.

Окончание табл. 1

№ образца	Условия гидролиза		№ образца	Условия гидролиза	
кукурузный крахмал, 0,5 н. р-р H ₂ SO ₄ , 6 ч.			кукурузный крахмал, 0,5 н. р-р HCl, 6 ч.		
11.1	суспензия 20 %	t=30 °C	14.1	суспензия 20 %	t=30 °C
11.2		t=40 °C	14.2		t=40 °C
11.3		t=50 °C	14.3		t=50 °C
12.1	суспензия 30 %	t=30 °C	15.1	суспензия 30 %	t=30 °C
12.2		t=40 °C	15.2		t=40 °C
12.3		t=50 °C	15.3		t=50 °C
13.1	суспензия 40 %	t=30 °C	16.1	суспензия 40 %	t=30 °C
13.2		t=40 °C	16.2		t=40 °C
13.3		t=50 °C	16.3		t=50 °C
кукурузный крахмал					
суспензия 40%, t=50 °C			суспензия 40%, t=50 °C		
17.1	0,1 н. р-р H ₂ SO ₄	2 ч.	19.1	0,5 н. р-р H ₂ SO ₄	2 ч.
17.2		4 ч.	19.2		4 ч.
17.3		6 ч.	19.3		6 ч.
18.1	0,1 н. р-р HCl	2 ч.	20.1	0,5 н. р-р HCl	2 ч.
18.2		4 ч.	20.2		4 ч.
18.3		6 ч.	20.3		6 ч.

Крахмальные фракции (амилоза и амилопектин) компактно упакованы в крахмальные зерна (или гранулы) [1–3, 12–17]. На основании известных данных о многоуровневой структуре крахмала (амилозы, амилопектина, гранул, конгломератов гранул) нами осуществлялась планировка эксперимента.

Планирование эксперимента. Нами был спланирован и проведен многофакторный эксперимент с помощью программы STATISTICA 8.0.

Для определения предпочтительных параметров кислотного гидролиза картофельного и кукурузного крахмала были выбраны факторы, оказывающие наибольшее влияние на условную вязкость картофельного и кукурузного крахмала, а также на средний диаметр гранул картофельного и кукурузного крахмала обозначены следующим образом:

- Y₁ – условная вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала, с;
- Y₂ – условная вязкость 6 %-ого водного клейстера кукурузного крахмала, с;
- Y₃ – средний диаметр гранул картофельного крахмала, мкм;
- Y₄ – средний диаметр гранул кукурузного крахмала, мкм;
- X₁ – температура, °C;
- X₂ – продолжительность гидролиза, ч;
- X₃ – концентрация крахмальной суспензии, %;
- X₄ – вид и концентрация кислоты (1–4), где 1 – H₂SO₄ 0,5 н. р-р, 2 – HCl 0,5 н. р-р, 3 – H₂SO₄ 0,1 н. р-р, 4 – HCl 0,1 н. р-р.

Диапазоны значений концентрации суспензии, температуры и времени гидролиза, вида и концентрации кислоты определены на основании изучения литературных источников, технической документации по производству крахмала и крахмалопродуктов, а также проведения предварительных испытаний по определению условной вязкости 6 %-ого водного клейстера картофельного и кукурузного крахмалов и среднего диаметра крахмальных гранул.

В качестве кислот были использованы серная и соляная кислоты. Эти кислоты в соответствии с современной теорией сильных электролитов в полной мере диссоциируют при любых концентрациях, но активность водородных ионов этих кислот из-за проявления межмолекулярного притяжения различна. Каталитическое действие кислот пропорционально не общей концентрации водородных ионов, а концентрации только активной их части. Азотную кислоту не использовали из-за возникновения побочных (окислительных) реакций. Остальные кислоты малоактивны. На основании проведенных поисковых научно-исследовательских работ установлено, что наиболее оптимальными для гидролиза являются 0,1 и 0,5 н.

Время гидролиза составило 2, 4 и 6 ч. Производство химически модифицированного кислотного гидролизованного крахмала на крахмальном заводе, как правило, осуществляется в одну смену,

поэтому максимальное время гидролиза не должно превышать 6 ч. Проводить гидролиз менее 2 ч не целесообразно, т.к. не удастся достичь необходимой степени модификации.

В ходе предварительных экспериментов было установлено, что в интервале 30–40 °С, условная вязкость быстро снижалась. Также падение вязкости продолжалось в интервале температур от 40 до 50 °С, когда процесс гидролиза ускоряется, что соответствует правилу Ван-Гоффа (с повышением температуры на 10 °С скорость реакции увеличивается в 2–4 раза). Для того чтобы сохранить крахмальные гранулы в ходе кислотного гидролиза, необходимо, чтобы максимальная температура процесса не превышала температуру клейстеризации крахмала (температура начала клейстеризации картофельного крахмала – 60 °С, температура начала клейстеризации кукурузного крахмала – 70 °С). Сохранение зернистости кислотного гидролизованного крахмала после проведения гидролиза позволяет отделить его от жидкой фазы простыми технологическими операциями. При повышении температуры водных дисперсий более 30 °С происходит частичный разрыв водородных связей в молекул в зерне крахмала, который приводит к изменениям его микроструктуры. Исходя из этого, нами были выбраны следующие температуры гидролиза 30, 40, 50 °С.

Концентрация крахмальных суспензий в технологии получения крахмала варьируется от 10 до 40 %. Поэтому нами были выбраны концентрации крахмальных суспензий 20, 30, 40 %.

Критериями для оценки влияния исследуемых факторов служили условная вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного и кукурузного крахмалов в с (Y_1), (Y_2) соответственно, а также средний диаметр гранул картофельного и кукурузного крахмалов в мкм (Y_3), (Y_4) соответственно.

Математическая модель зависимости условной вязкости 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала от условий холодного кислотного гидролиза представлена на рис. 2.

Также нами была получена математическая модель зависимости среднего диаметра гранул картофельного крахмала от условий холодного кислотного гидролиза, математическая модель зависимости условной вязкости 6 %-ого водного клейстера кукурузного крахмала от условий холодного кислотного гидролиза, а также математическая модель зависимости среднего диаметра гранул кукурузного крахмала от условий холодного кислотного гидролиза.

Генерализованная модель для условной вязкости 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала. В качестве плана регрессионного анализа была выбрана регрессия поверхности отклика.

Получено следующее уравнение регрессии, адекватно описывающее влияние температуры и продолжительности гидролиза, концентрации крахмальной суспензии, вида и концентрации кислоты на условную вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала:

$$Y_1 = \exp(-37,9832 + 0,4341 \cdot X_1 - 0,0052 \cdot X_1^2 + 9,0352 \cdot X_2 - 0,5835 \cdot X_2^2 + 0,1452 \cdot X_3 - 0,0015 \cdot X_3^2 + 23,8184 \cdot X_4 - 1,9743 \cdot X_4^2 - 0,003 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,1046 \cdot X_1 \cdot X_4 - 2,6342 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0125 \cdot X_3 \cdot X_4).$$

Значение p для всех признаков меньше 0,001, что говорит о значимом влиянии на условную вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала всех исследуемых факторов.

Анализ прогнозируемых и экспериментальных значений по исследуемым критериям (условная вязкость 6 %-ого водного клейстера) доказал адекватность и работоспособность полученных уравнений регрессии.

Полученные экспериментальные данные позволяют установить оптимальные технологические параметры производства кислотного гидролизованного крахмала, определяющие оптимальную условную вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала.

Генерализованная модель для среднего диаметра гранул картофельного крахмала. Для среднего диаметра гранул наилучшим образом подошла модель множественной регрессии со следующим уравнением:

$$Y_3 = \exp(4,7369 - 0,0118 \cdot X_1 - 0,0922 \cdot X_2 - 0,0028 \cdot X_3 + 0,0376 \cdot X_4).$$

Все параметры данной модели также являются статистически значимыми ($p < 0,001$).

Генерализованная модель для условной вязкости 6 %-ого водного клейстера кукурузного крахмала. Для условной вязкости 6 %-ого водного клейстера в случае кукурузного крахмала наилучшим образом также подошла модель регрессии поверхности отклика, как и в случае картофельного крахмала, однако не все параметры модели являются статистически значимыми. Следует отметить, что время гидролиза имеет самое высокое значение $p = 0,225$, что указывает на наименьшее влияние на зависимый признак.

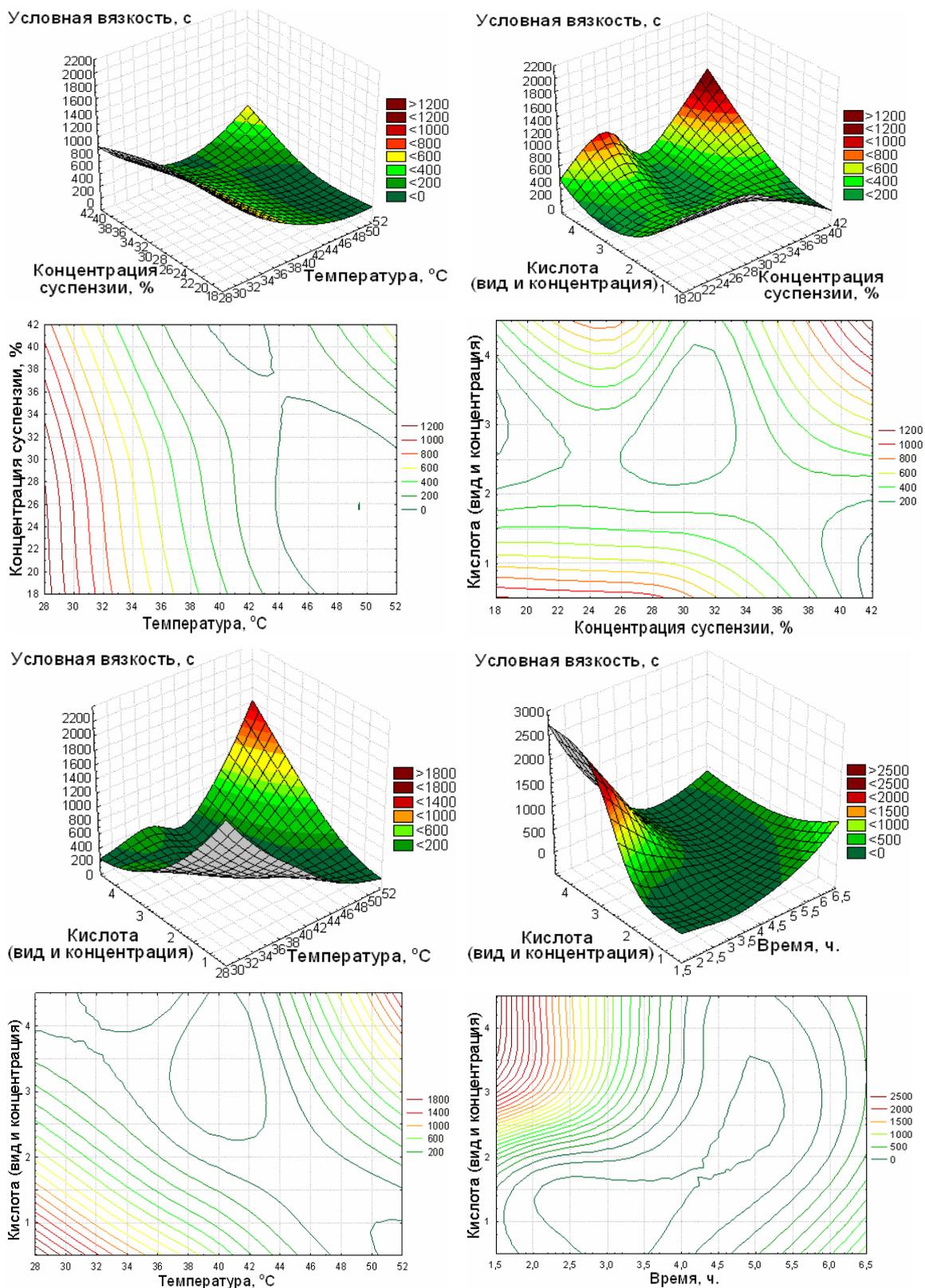


Рис. 2. Математическая модель зависимости условной вязкости 6 %-ого водного клейстера картофельного крахмала от условий холодного кислотного гидролиза

Fig. 2. Mathematical model of dependence of conditional viscosity of 6 % aqueous paste of potato starch on the conditions of cold acid hydrolysis

После упрощения первоначального вида уравнения модели с учетом исключения незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии, адекватно описывающее влияние условий проведения кислотного гидролиза на условную вязкость 6 %-ого водного клейстера кукурузного крахмала, имеет вид:

$$Y_2 = \exp(28,6379 - 0,7137 \cdot X_1 + 0,0049 \cdot X_1^2 - 0,2563 \cdot X_2 + 0,0326 \cdot X_2^2 - 0,4951 \cdot X_3 - 0,0048 \cdot X_3^2 - 0,4911 \cdot X_4 - 0,1926 \cdot X_4^2 + 0,012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,10208 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,045 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,1771 \cdot X_3 \cdot X_4).$$

Генерализованная модель для среднего диаметра гранул кукурузного крахмала. Для среднего диаметра гранул была использована полиномиальная модель следующего вида:

$$Y_4 = \exp(5,0262 - 0,035 \cdot X_1 + 0,0003 \cdot X_1^2 + 0,0809 \cdot X_2 - 0,0179 \cdot X_2^2 - 0,0413 \cdot X_3 + 0,0005 \cdot X_3^2 - 0,1198 \cdot X_4 + 0,0251 \cdot X_4^2).$$

Полученное уравнение регрессии, позволяет установить взаимосвязь размеров гранул кукурузного крахмала с режимами кислотного гидролиза (температурой, продолжительностью гидролиза, концентрацией крахмальной суспензии, видом и концентрацией кислоты).

Температура, время гидролиза, тип и концентрация минеральной кислоты, а также концентрация крахмальной суспензии оказывали существенное влияние на физико-химические свойства (средний диаметр крахмальных гранул и условную вязкость). При повышении времени гидролиза с 2 до 6 ч, температуры с 30 до 50 °С, концентрации суспензии с 20 % до 40 % условная вязкость клейстера картофельного крахмала снижалась от более 1380 до 11,8, кукурузного от 470 с до 11,6 с при одновременном уменьшении среднего диаметра гранул картофельного крахмала от 46,4 мкм до 32,3 мкм, кукурузного от 35,2 мкм до 17,0 мкм. Соляная кислота оказывала большее по сравнению с серной кислотой воздействие на изменение структуры и свойств крахмала.

При ужесточении режимов холодного гидролиза как картофельного, так и кукурузного крахмала (увеличении концентрации кислоты и времени гидролиза) наблюдалось уменьшение среднего размера крахмальных гранул при одновременном понижении условной вязкости крахмальных клейстеров.

Подобранные математические модели в целом описывают процесс кислотного гидролиза крахмала минеральными кислотами. Данные модели хорошо демонстрируют общую тенденцию изменений условной вязкости крахмального клейстера и размера крахмальных гранул от технологических режимов. Представленные модели неплохо предсказывают изменение размера крахмальных гранул в зависимости от технологических режимов, а также изменения условной вязкости от 1380 до 100 с.

Однако на низких значениях условной вязкости крахмальных клейстеров, начиная с 100 с, приведенные математические модели не имеют предсказательного эффекта. Для точного предсказания влияния технологических режимов гидролиза на изменения условной вязкости крахмального клейстера, при низких значениях начиная со 100 с и меньше, целесообразно подобрать более точную математическую модель в более узком диапазоне рассматриваемого процесса.

В крахмальной грануле имеются связанные молекулы воды [1, 12, 13, 16]. Количество связанной влаги определяется генетически и зависит от особенностей технологии получения крахмала. Химическая модификация, как правило, осуществляется в водной среде. Вначале происходит набухание крахмальной гранулы, в результате которого в гранулу проникают свободные молекулы воды и молекулы растворенного в воде химического агента. Иногда в качестве растворителя используют органическое вещество. При достижении определенного критического момента набухания крахмальной гранулы (т.е. при критическом содержании молекул воды или другого растворителя и химического агента в полости гранулы), по-видимому, начинается процесс разрыхления кристаллических участков, что делает их доступными для воздействия химического агента и усиливает химическую модификацию. Процесс разрыхления кристаллических участков катализируется при повышении температуры [1, 12, 13, 16].

Нами проводился холодный кислотный гидролиз крахмала при температуре не выше + 50 °С, что не является критической температурой и полностью исключает возможность разрушения крахмальных гранул, т.е. процесс клейстеризации крахмала. По-видимому, при холодном гидролизе крахмала происходит частичное разрыхление кристаллических участков и внутреннее расщепление полимерных цепей, преимущественно амилозы, т.к. именно амилоза формирует аморфные участки – доступные для воздействия химического модифицирующего агента (минеральной кислоты).

Гидролизованые кислотой крахмалы широко используют в пищевой промышленности для приготовления мягких конфет, жележных изделий, рахат-лукума, корпусов шоколадных конфет, пудинговых смесей, при производстве пастилы, жевательных резинок, защитных плёнок, стабилизации фруктовых и ягодных желе [14, 15, 17]. Кроме того, кислотногидрозованный крахмал используют в других: в текстильной промышленности для шлихтования основ и отделки как хлопчатобумажных, так и смешанных тканей, в производстве подкрахмаливающих средств и т.д. [14, 15, 17].

Установлено, что наибольшее применение в пищевой промышленности и технических целях имеют кислотногидролизованые крахмалы с мелкими крахмальными гранулами и низкой условной вязкостью крахмальных клейстеров, что отмечалось при следующих технологических режимах холодного кислотного гидролиза для:

- ♦ картофельного крахмала: концентрация крахмальной суспензии – 40 %, температура гидролиза – 50 °С, время гидролиза – 6 ч, модифицирующий агент – соляная кислота, концентрация кислоты – 0,5 н. раствор,
- ♦ кукурузного крахмала: концентрация крахмальной суспензии – 40 %, температура гидролиза – 50 °С, время гидролиза – 6 ч, модифицирующий агент – соляная кислота, концентрация кислоты – 0,5 н. раствор.

Кислотногидролизованые крахмала с наименьшим средним размером крахмальных гранул и наименьшей условной вязкостью крахмальных клейстеров могут с успехом найти применение в пищевой промышленности при приготовлении сухих смесей киселей, а также в технических целях:

- ♦ при производстве гипсокартонных изделий в качестве связующего,
- ♦ в качестве шлихтующей основы при шлихтовании хлопчатобумажных и смешанных нитей, а также
- ♦ при производстве стекловолкна в качестве основы замасливателей.

Заключение. В результате проведенного исследования нами получены уравнение регрессии, адекватно описывающее:

1. Влияние режимов кислотного гидролиза (температуры и продолжительности гидролиза, концентрации крахмальной суспензии, вида и концентрации кислоты) на условную вязкость 6 %-ого водного клейстера картофельного и кукурузного крахмала.

2. Взаимосвязь размеров крахмальных гранул с режимами кислотного гидролиза (температурой, продолжительностью гидролиза, концентрацией крахмальной суспензии, видом и концентрацией кислоты).

При усилении режимов холодного гидролиза минеральными кислотами как картофельного, так и кукурузного крахмала (увеличении концентрации кислоты и времени гидролиза) отмечено уменьшение среднего размера крахмальных гранул при одновременном понижении условной вязкости крахмальных клейстеров.

Подобранные математические модели в целом описывают процесс кислотного гидролиза крахмала минеральными кислотами. Представленные модели неплохо предсказывают изменение размера крахмальных гранул в зависимости от технологических режимов, а также изменения условной вязкости от 1380 до 100 с. На низких значениях условной вязкости крахмальных клейстеров, начиная с 100 с, приведенные математические модели не имеют предсказательного эффекта. Для точного предсказания влияния технологических режимов гидролиза на изменения условной вязкости крахмального клейстера, при низких значениях начиная со 100 с и меньше, целесообразно подобрать более точную математическую модель в более узком диапазоне рассматриваемого процесса.

Наибольшее применение в пищевой промышленности и технических целях имеют кислотногидролизованые крахмалы с маленькими крахмальными гранулами и низкой условной вязкостью крахмальных клейстеров.

Список использованных источников

1. Литвяк, В.В. Развитие теории и практики модификации крахмалосодержащего сырья для создания новых продуктов: автореф. дис. ...д-ра. техн. наук: 05.18.05. / В.В. Литвяк; ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар, 2013. – 48 с.
2. Полумбрик, М.О. Углеводы в пищевых продуктах / М.О. Полумбрик, В.В. Литвяк, З.В. Ловкис, В.Н. Ковбаса. – Минск : ИВЦ Минфина, 2016. – 592 с.

3. Крахмал и крахмалопродукты / Н.Г. Глюк, А.И. Жушман, Т.А. Ладур, Е.А. Штыркова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 240 с.
4. Литвяк, В.В. Дослідження властивостей крохмалю обробленого озоном / В.В. Литвяк, Т.П. Троцька, А.А. Литвинчук, Е.В. Рощина, Е.В. Ребенок, М.П. Купчик, О.Ю. Мельник // Цукар України: наукова-практичний галузевий журнал. – 2006. – Т.49, №6. – С. 29–32.
5. Литвяк, В.В. Порівняльна оцінка властивостей деяких видів крохмалю та їх вплив на якість хлібних виробів / В.В. Литвяк, Д.П. Лісовська, О.В. Грабовська // Цукар України: наукова-практичний галузевий журнал. – 2011. – Т.64, №4. – С. 48–53.
6. Шишонок, М.В. Структура и свойства картофельного крахмала, облученного ускоренными электронами / М.В. Шишонок, В.В. Литвяк, Е.А. Мурашко, Е.В. Гринюк, Л.И. Сальников, Л.П. Рогинец, Л.П. Круль // High Energy Chemistry. – Т.41, №6. – 2007. – С. 483–487.
7. Бутрим, С.М. Изучение физико-химических свойств экструзионных крахмалов различного биологического происхождения / С.М. Бутрим, В.В. Литвяк, В.В. Москва // Russian Journal of Applied Chemistry. – Т.82, №7. – 2009. – С. 1099–1103.
8. Литвяк, В.В. Получение набухающего крахмала и исследование его молекулярной и надмолекулярной структуры / В.В. Литвяк, С.М. Бутрим, В.В. Москва // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – Т.53. – Вып. 6. – 2010. – С. 78–82.
9. Бутрим, С.М. Особенности катионизации 3-хлор-2-гидроксипропилтриметиламмоний хлоридом тапиокового крахмала / С.М. Бутрим, В.В. Литвяк // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – Т.57. – Вып. 4. – 2014. – С. 90–94.
10. Алексеенко, М.С. Получение и исследование свойств кислотного гидролизованного картофельного крахмала / М.С. Алексеенко, Т.Д. Бильдюкевич, Н.С. Бутрим, С.М. Бутрим, В.В. Литвяк // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – Т.58. – Вып. 8. – 2015. – С. 58–62.
11. Козлова, Л. Особенности накопления и морфологии крахмала сортов картофеля белорусской селекции / Людмила Козлова, Владимир Литвяк, Инна Мельситова // Наука и инновации: научно-практический журнал. – №9(91). – 2010. – С. 43–48.
12. Литвяк, В.В. Механизм химической модификации крахмала / В.В. Литвяк, Ю.Ф. Росляков // Известия высших учебных заведений. Серия Пищевая технология. – 2013. – №2–3. – С. 31–35.
13. Литвяк, Владимир. Формирование крахмальной гранулы и механизм химической модификации крахмала / Владимир Литвяк, Маргарита Алексеенко, Альберт Канарский // Наука и инновации: научно-практический журнал. – 2016. – №3(157). – С. 63–67.
14. Химия и технология крахмала: Промышленные вопросы: пер. с англ.: под ред. Роя Л. Уилстера и Энжена Ф. Пашаля. – М.: Пищ. пром-сть, 1975. – 360 с.
15. Керр, Р.В. Химия и технология крахмала / Р.В. Керр, Ж.В. Цезар, Л.М. Кристенсен и др.; под ред. Р.В. Керра; пер. с англ. – М.: Пищепромиздат, 1956. – 579 с.
16. Андреев Н.Р. Основы производства нативных крахмалов. М.: Изд.: Пищепромиздат, 2001. – С. 289.
17. Жушман, А.И. Модифицированные крахмалы / А.И. Жушман. – М.: Пищепромиздат, 2007. – 236 с.
18. Nikhil K. Chrungoo. Morphological and Rheological Properties of Starches Separated from Cultivars of Rice (*Oryza sativa* L.) from North East India / Nikhil K. Chrungoo, Ayam Gangarani Devi // American Journal of Plant Sciences. – Vol. 6. – 2015. P. 2019–2031.
19. Makella, M.J. Studies on Oat Starch with a Celloscope: Granule Size and Distribution / M.J. Makella, S. Laakso // Starch/Starke. – 2006. – Vol. 36. – P. 159–163.
20. Sylvia de Pater. Manipulation of starch granule size distribution in potato tubers by modulation of plastid division / Sylvia de Pater, Martien Caspers, Marijke Kottenhagen, Henk Meima, Renaldo Ter Stege, Nick de Vetten // Plant Biotechnology Journal. – 2006. – Vol. 4, No. 1. – P. 123–134.
21. Jane, J-L. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy / J-L. Jane, T. Kasemsuwan, S. Leas, H. Zobel, J.F. Robyt // Starch-Starke. – 1994. – Vol. 46. – P. 121–129.

22. Malinski, E. Isolation of small starch granules and determination of their fat mimic characteristics / E. Malinski, J.R. Daniel, X.X. Zhang, R.L. Whistler // *Cereal Chem.* – 2003. – Vol. 80. – P. 1–4.
23. Pěřez, S. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review / S. Pěřez, E. Bertoft // *Starch-Starke.* – 2010. – Vol. 62. – P. 389–420.
24. Buleon, A. Starch granules: structure and biosynthesis / A. Buleon, P. Colonna, V. Planchot, S. Ball // *Int J Biol Macromol.* – 1998. – Vol. 23. – P. 85–112.
25. Sahlstrom, S. Influence of starch granule size distribution on bread characteristics / S. Sahlstrom, E. Brathen, P. Lea, K. Autio // *J Cereal Sci.* – 1998. – Vol. 28. – P. 157–164.
26. Yonemoto, P.G. Effect of granule size on the structural and physico-chemical characteristics of wheat starch / P.G. Yonemoto, D.M.A. Calori, C.M.L. Franco // *Ciknc Tecnol Aliment.* – 2007. – Vol. 27. – P. 761–771.
27. Takeda, Y. Structures of large, medium and small starch granules of barley grain / Y. Takeda, C. Takeda, H. Mizukami, I. Hanashiro // *Carbohydr Polym.* – 1999. – Vol. 38. – P. 109–114.
28. Swinkels, J.J.M. Composition and Properties of commercial Native Starches / J.J.M. Swinkels // *Starch/Starke.* – 1985. – Vol. 37. – P. 1–5.
29. Zobel, H.F. Molecules to Granules: A Comprehensive Starch Review / H.F. Zobel // *Starch/Starke.* – 1988. – Vol. 40. – P. 44–50.
30. Dengate, H. Variation in size distribution of starch granules from wheat grain / H. Dengate, P. Meredith // *J Cereal Sci.* – 1984. – Vol. 2. – P. 83–90.
31. Stoddard F.L. Survey of starch particle-size distribution in wheat and related species / F.L. Stoddard // *Cereal Chem.* – 1999. – Vol. 76. – P. 145–9.
32. Lindebloom, N. Analytical, Biochemical and Hysiochemical Aspects of Starch Granule Size, with Emphasis on Small Granule Starches: A Review / N. Lindebloom, P.R. Chang, R.T. Tyler // *Starch/Starke.* – 2004. – Vol. 56. – P. 89–99.

References

1. Litvyak, V.V. The development of the theory and practice of modification of starch-containing raw materials for the creation of new products: author. dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.18.05. / V.V. Litvyak; FGBOU VPO «Kuban State Technological University». – Krasnodar, 2013. – 48 s.
2. Polumbrik, M.O. Uglevody v pischevyyh produktah / M.O. Polumbrik, V.V. Litvyak, Z.V. Lovkis, V.N. Kovbasa. – Minsk: IVTs Minfina, 2016. – 592 s.
3. Krahmal i krahmaloprodukty / N.G. Glyuk, A.I. Zhushman, T.A. Ladur, E.A. Shtyirkova. – M.: Agropromizdat, 1985. – 240 s.
4. Litvyak, V.V. Doslidzhennya v povisimosti krokhmalu obroblenogo ozone / V.V. Litvyak, T.P. Trotskaya, A.A. Litvinchuk, E.V. Roshchina, E.V. Child, MP Kupchik, O.Yu. Melnik // *Tsukar Ukraini: a naukova-practical gallery.* – 2006. – T.49, №6. – S. 29–32.
5. Litvyak, V.V. The assessment of the power of the acts of vidiv starchy and ihpl on the strength of good virobiv / V.V. Litvyak, D.P. Lisovska, O.V. Grabovska // *Tsukar Ukraini: a naukova-practical gallery.* – 2011. – T.64, №4. – S. 48–53.
6. Shishonok, M.V. Structure and properties of potato starch irradiated with accelerated electrons / M.V. Shishonok, V.V. Litvyak, E.A. Murashko, E.V. Grinyuk, L.I. Salnikov, L.P. Roginets, L.P. Krul // *High Energy Chemistry.* – T.41, №6. – 2007. – S. 483–487.
7. Butrim, S.M. Study of the physicochemical properties of extrusion starches of various biological origin / S.M. Butrim, V.V. Litvyak, V.V. Moscow // *Russian Journal of Applied Chemistry.* – T.82, №7. – 2009. – S. 1099–1103.
8. Litvyak, V.V. Obtaining swelling starch and the study of its molecular and supramolecular structure / V.V. Litvyak, S.M. Butrim, V.V. Moscow // *Proceedings of higher educational institutions. Ser. Chemistry and chemical technology.* – T.53, №6. – 2010. – S. 78–82.

9. Butrim, S.M. Features of cationization of 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride tapioca starch / S.M. Butrim, V.V. Litvyak // News of higher educational institutions. Ser. Chemistry and chemical technology. – T.57, №4. – 2014. – S. 90–94.
10. Alekseenko, M.S. Preparation and study of the properties of acid-hydrolyzed potato starch / M.S. Alekseenko, T.D. Bilyukevich, N.S. Butrim, S.M. Butrim, V.V. Litvyak // News of higher educational institutions. Ser. Chemistry and chemical technology. – T.58, №8. – 2015. – S. 58–62.
11. Kozlova, L. Features of the accumulation and morphology of starch varieties of potatoes of the Belarusian selection / Lyudmila Kozlova, Vladimir Litvyak, Inna Melsitova // Science and Innovations: a scientific journal. – №9 (91). – 2010. – S. 43–48.
12. Litvyak, V.V. Mechanism of starch chemical modification / V.V. Litvyak, Yu.F. Roslyakov // News of higher educational institutions. Food Technology Series. – 2013. – №2–3. – S. 31–35.
13. Litvyak, Vladimir. The formation of starch granules and the mechanism of chemical modification of starch / Vladimir Litvyak, Margarita Alekseenko, Albert Kanarsky // Science and Innovations: Scientific Journal. – 2016. – №3 (157). – S. 63–67.
14. Himiya i tehnologiya krahmala: Promyishlennyye voprosyi: per. s angl.: pod red. Roya L. Uilster i Enzhena F. Pashalya. – M.: Pisch. prom-st, 1975. – 360 s.
15. Kerr, R.V. Himiya i tehnologiya krahmala / R.V. Kerr, Zh.V. Tsezar, L.M. Kristensen i dr.; pod red. R.V. Kerra; per. s angl. – M.: Pischepromizdat, 1956. – 579 s.
16. Andreev N.R. Osnovy proizvodstva nativnykh krahmalov. M.: Izd.: Pischepromizdat, 2001. – S. 289.
17. Zhushman, A.I. Modifitsirovannyye krahmaly / A.I. Zhushman. – M.: Pischepromizdat, 2007. – 236 s.
18. Nikhil K. Chrungoo. Morphological and Rheological Properties of Starches Separated from Cultivars of Rice (*Oryza sativa* L.) from North East India / Nikhil K. Chrungoo, Ayam Gangarani Devi // American Journal of Plant Sciences. – Vol. 6. – 2015. P. 2019–2031.
19. Makella, M.J. Studies on Oat Starch with a Celloscope: Granule Size and Distribution / M.J. Makella, S. Laakso // Starch/Starke. – 2006. – Vol. 36. – P. 159–163.
20. Sylvia de Pater. Manipulation of starch granule size distribution in potato tubers by modulation of plastid division / Sylvia de Pater, Martien Caspers, Marijke Kottenhagen, Henk Meima, Renaldo Ter Stege, Nick de Vetten // Plant Biotechnology Journal. – 2006. – Vol. 4, No. 1. – P. 123–134.
21. Jane, J-L. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy / J-L. Jane, T. Kasemsuwan, S. Leas, H. Zobel, J.F. Robyt // Starch-Starke. – 1994. – Vol. 46. – P. 121–129.
22. Malinski, E. Isolation of small starch granules and determination of their fat mimic characteristics / E. Malinski, J.R. Daniel, X.X. Zhang, R.L. Whistler // Cereal Chem. – 2003. – Vol. 80. – P. 1–4.
23. Pírez, S. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review / S. Pírez, E. Bertoft // Starch-Starke. – 2010. – Vol. 62. – P. 389–420.
24. Buleon, A. Starch granules: structure and biosynthesis / A. Buleon, P. Colonna, V. Planchot, S. Ball // Int J Biol Macromol. – 1998. – Vol. 23. – P. 85–112.
25. Sahlstrom, S. Influence of starch granule size distribution on bread characteristics / S. Sahlstrom, E. Brathen, P. Lea, K. Autio // J Cereal Sci. – 1998. – Vol. 28. – P. 157–164.
26. Yonemoto, P.G. Effect of granule size on the structural and physico- chemical characteristics of wheat starch / P.G. Yonemoto, D.M.A. Calori, C.M.L. Franco // Círculo Tecnol Aliment. – 2007. – Vol. 27. – P. 761–771.
27. Takeda, Y. Structures of large, medium and small starch granules of barley grain / Y. Takeda, C. Takeda, H. Mizukami, I. Hanashiro // Carbohydr Polym. – 1999. – Vol. 38. – P. 109–114.
28. Swinkels, J.J.M. Composition and Properties of commercial Native Starches / J.J.M. Swinkels // Starch/Starke. – 1985. – Vol. 37. – P. 1–5.
29. Zobel, H.F. Molecules to Granules: A Comprehensive Starch Review / H.F. Zobel // Starch/Starke. – 1988. – Vol. 40. – P. 44–50.
30. Dengate, H. Variation in size distribution of starch granules from wheat grain / H. Dengate, P. Meredith // J Cereal Sci. – 1984. – Vol. 2. – P. 83–90.

31. Stoddard F.L. Survey of starch particle-size distribution in wheat and related species / F.L. Stoddard // Cereal Chem. – 1999. – Vol. 76. – P. 145–9.
32. Lindebloom, N. Analytical, Biochemical and Hysiochemical Aspects of Starch Granule Size, with Emphasis on Small Granule Starches: A Review / N. Lindebloom, P.R. Chang, R.T. Tyler // Starch/Starke. – 2004. – Vol. 56. – P. 89–99.

Информация об авторах

Алексеенко Маргарита Сергеевна – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований Республиканского контрольно-испытательного комплекса РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, д. 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@belproduct.com

Новикова Наталья Михайловна – начальник учебно-методического отдела Международного государственного экологического института им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета (ул. Долгобродская, д. 23/1, 220070, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_novikava@tut.by

Литвяк Владимир Владимирович – доктор технических наук, кандидат химических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела технологий продукции из корнеклубнеплодов РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, д. 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@belproduct.com

Information about authors

Alekseenko Margarita S. – Graduate, Junior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Research, Republican Test Complex, RUE «Scientific-Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova street, Minsk, 220037, Republic of Belarus). E-mail: info@belproduct.com

Novikova Natalya M. – Head of Educational and Methodical Department Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute (23/1, Dolgobrodskaya street, Minsk, 220070, Republic of Belarus). E-mail: n_novikava@tut.by

Litvyak Vladimir V. – Dr (engineering), Ph.D (chemistry), Associate Professor, Chief Researcher of the Technology Department of Roots RUE «Scientific-Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova street, Minsk, 220037, Republic of Belarus). E-mail: info@belproduct.com