

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.896-906>
УДК 664.6/.7:621.928.6



Исследование процесса извлечения высококрахмалистой фракции ржаной муки пневмоклассификацией

© 2021. Н. Р. Андреев , В. Г. Гольдштейн, В. А. Коваленок, Л. П. Носовская, Л. В. Адикаева, А. А. Мирошников

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Московская область, Российская Федерация

В статье дан обзор современного состояния применения твёрдофазных методов разделения структуры зернового и зернобобового сырья на составляющие компоненты как одного из актуальных направлений защиты окружающей среды и снижения объемов сточных вод предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственное сырьё. Отмечено преобладающее направление исследований по производству белковых концентратов из зернобобового сырья (горох, фасоль, нут, люпин) методом пневмоклассификации. Среди зерновых культур особо выделяется рожь, имеющая более сбалансированный аминокислотный состав, по сравнению с пшеницей, и крупные зерна крахмала до 60 мкм, что улучшает аэродинамическое разделение зерновой муки на белковую и крахмальную фракции, поэтому ржаная мука явилась объектом исследований в данной работе. Область исследований включала разработку метода определения содержания крахмала в тяжёлой фракции ржаной муки от доли выхода лёгкой белковой фракции и содержания в ней крахмала при использовании установки с изменяемыми параметрами двухкамерного диспергатора и вихревого классификатора. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены результаты опытов по разделению массы исходной ржаной муки на тяжёлую крахмальную и лёгкую белковую фракции с заданным соотношением крахмала и белка. Установлены зависимости содержания крахмала в тяжёлой фракции от числа циклов её рециркуляции. При изменяемых параметрах измельчения ржаной муки, определяемых скоростью рабочих органов диспергатора от 70 до 100 м/с, временем измельчения и рециркуляции тяжёлой фракции 30 с и окружной скорости ротора классификатора 15 м/с получены стабильные результаты по разделению крахмала и белка: выход тяжёлой фракции 72 % с содержанием крахмала 85 % и выход лёгкой фракции 28 % с массовой долей белка не менее 26 %.

Ключевые слова: зерновая мука, диспергирование, сухое сепарирование, крахмальная фракция, белковая фракция

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН (тема № 0585-2019-0004-С-01).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Андреев Н. Р., Гольдштейн В. Г., Коваленок В. А., Носовская Л. П., Адикаева Л. В., Мирошников А. А. Исследование процесса извлечения высококрахмалистой фракции ржаной муки пневмоклассификацией. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):896-906. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.896-906>

Поступила: 20.07.2021

Принята к публикации: 10.11.2021

Опубликована онлайн: 15.12.2021

Investigation of the process of extraction of a highly starchy fraction of rye flour by air classification

© 2021. Nikolay R. Andreev , Vladimir G. Goldstein, Vladimir A. Kovalenok, Liliya P. Nosovskaya, Larisa V. Adikaeva, Alexander A. Miroshnikov

All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS, Moscow region, Russian Federation

The article provides an overview of the current state of the application of solid-phase methods for separating the structure of grain and leguminous raw material into constituent components, as one of the most relevant areas of environmental protection and reducing the amount of wastewater from enterprises processing agricultural raw materials. The main direction of research on the production of protein concentrates from leguminous raw materials (peas, beans, chickpeas, lupine) by the

method of air classification is noted. Among grain crops, rye stands out as having a more balanced amino acid composition compared to wheat and the largest starch grains up to 60 microns, which improves the aero-dynamic separation of grain flour into protein and starch fractions. Therefore, rye flour was the object of research in this work. The research area included the development of a method for determining the starch content in the heavy fraction of rye flour from the yield of its light protein fraction and its starch content using an installation with variable parameters of a two-chamber disperser and a vortex classifier. The results of experiments on the separation of the mass of the initial rye flour into heavy starch and light protein fractions with a given ratio of starch and protein are theoretically justified and experimentally confirmed. The dependences of the starch content in the heavy fraction on the number of cycles of its recycling are established. With variable parameters of grinding rye flour, determined by the speed of the working bodies of the dispersant from 70 to 100 m/s, the time of grinding and recirculation of the heavy fraction of 30 s and the tangential speed of the classifier rotor of 15 m/s, stable results were obtained for the separation of starch and protein. The yield of the heavy fraction of 72 % with a starch content of 85 % and the yield of the light fraction of 28 % with a mass fraction of protein of at least 26 %.

Keywords: grain flour, dispersion, dry separation, starch fraction, protein fraction

Acknowledgment: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS (theme No. 0585-2019-0004-C-01).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citations: Andreev N. R., Goldstein V. G., Kovalenok V. A., Nosovskaya L. P., Adikaeva L. V., Miroshnikov A. A. Investigation of the process of extraction of a highly starchy fraction of rye flour by air classification. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):896-906. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.896-906>

Received: 20.07.2021

Accepted for publication: 10.11.2021

Published online: 15.12.2021

Одним из актуальных направлений защиты окружающей среды и снижения объемов сточных вод предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственное сырьё, является исследование и применение твёрдофазных «сухих» методов разделения структуры сырья на составляющие его компоненты. При «сухом» способе зерновое и зернобобовое сырьё подвергается многостадийному измельчению и просеиванию для получения муки, которая затем подвергается диспергированию и пневмокласификации для разделения её на белковую и крахмальную фракции. Эффективность отделения белка от крахмала определяется процентным его содержанием в выделенных обеих фракциях, в процентах от общего содержания белка в муке [1, 2].

Предложены методы оценки тонкого измельчения и классификации и введено понятие «критической границы» разделения, представляющей собой такой размер частицы, при котором достигается максимальная четкость разделения продукта, т. е. количество крупных частиц в мелкой фракции и мелких в крупной является минимальным [3, 4], однако такой метод оценки не характеризует качество разделения на белковую и крахмальную фракции из-за совпадения размеров мелких и дроблёных зёрен крахмала с частицами белка.

Основное направление по разработке технологий и оборудования для измельчения и пневмокласификации материалов включает мельницу тонкого измельчения со встроенным

или выносным классификатором для разделения материала на крупную и мелкую фракции, в котором частицы фракций разделяются по размерам, форме и плотности, что используется для пневмокласификации измельчённого крахмалсодержащего сырья, состоящего из двух основных компонентов: крахмала до 80 % и белка от 8 до 50 %, в зависимости от вида зернового и зернобобового сырья.

Даже для одного вида сырья мягкой пшеницы разных сортов с исходным содержанием в муке белка 16,4, 12,1 и 8,2 % получены пневмокласификацией фракции с массовой долей белка 27,2, 21,5 и 17,4 %, то есть чем выше содержание белка в исходной муке, тем выше его в белковой фракции. Установлено, что средний размер частиц белковой фракции 17 мкм, а крахмальной фракции – 35 мкм [5].

При одноразовом измельчении и пневмокласификации не удаётся получить удовлетворительные результаты по выделению белковой фракции муки, поэтому многие исследования проводились в несколько стадий измельчения и пневмокласификации крупной фракции муки [6].

При двухстадийном измельчении и пневмокласификации гороховой муки с использованием дезинтегратора 250 СВ и классификатора 132 МР установлено, что после первой стадии, при исходном содержании крахмала в муке 72,4 % и белка 23,5 %, крупная фракция содержала крахмала 73,4 %, а после второй стадии 81,0 % [7].

С использованием высокоскоростного оборудования Hosokawa Alpine – дезинтегратора Mill ZPS и классификатора Turboplex ClassifierATP получено содержание белка в лёгкой фракции 50,9 %, а в крупной 11,8 %, при содержании в исходной гороховой муке 23,7 % белка. При измельчении и пневмоклассификации фасоловой муки, имеющей исходное содержание белка 37,8 %, получено содержание белка в лёгкой фракции 70,5 %, а в крупной 25 %¹.

Процесс пневмоклассификации очень чувствителен к степени измельчения муки, гранулометрическому составу крахмала и распределению его по фракциям [8, 9, 10].

На установке с диспергатором и выносным классификатором при порционной загрузке гороховой муки получены концентрат белка в количестве 8,5-9,5 % с массовой долей белка 60-64 % и крахмала в нём – 5,8-11,7 %, а выход тяжелой (крахмальной) фракции составил 90,5-91,5 % с массовой долей крахмала 68,5-70,1 % и белка 16,7-17,1 % [11].

Во ВНИИ зерна на установке пневмоклассификации проведены исследования по обогащению тритикалевой муки с использованием секционного центробежно-роторного пневмоклассификатора, осуществляющего диспергирование муки и разделение её на три фракции: первая фракция содержала наибольшее количество белка – до 28 %, углеводов до 55 %; вторая в среднем – 18 % белка и 66 % углеводов, а третья фракция – 6 % белка и 80 % углеводов. Скорость уноса частиц в пневмоклассификаторе составляла в пределах 1,5 м/с, окружная скорость ротора – 70 м/с [12].

При измельчении пшеничных и ржаных отрубей и овсяной лузги до размеров частиц менее 200 мкм и обработке на лабораторном пневмоклассификаторе получено от 30 до 37 % высокобелковой муки с содержанием белка 19,0 и 17,5 % [13].

Исследованиями по пневмоклассификации семи сортов ячменной муки, полученной при размоле голозерного, пленчатого, высокоамилозного ячменя с высокой массовой долей клетчатки, установлено, что во фракции с высоким содержанием крахмала его массовая доля составила 72-79 % для муки, полученной из традиционных и голозёрных сортов ячменя. Во фракциях, обогащенных протеином, его

массовая доля для разных сортов составляла 14-26 % [1, 14].

Для производства высокобелковой муки, в большинстве случаев, направляют муку высшего сорта на дальнейшее измельчение в машины ударного действия, отличающиеся сложностью конструкции и высокой энергоёмкостью [15, 16].

В области сухого способа разделения структуры измельчённого сырья на фракции по размерам, форме и плотности частиц требуется проведение экспериментальных исследований влияния факторов диспергирования и пневмоклассификации на эффективность разделения.

Цель исследования – повышение содержания крахмала в тяжёлой фракции и белков в лёгкой фракции ржаной муки для эффективного их использования в производстве пищевых продуктов.

Научная новизна работы заключается в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении установления зависимостей разделения крахмальных и белковых фракций от факторов диспергирования и пневмоклассификации ржаной муки.

Материал и методы. Материалом для изучения служила мука ржаная ГОСТ 7045-2017: белок $7,5 \pm 0,5$ %, жир $1,4 \pm 0,2$ %, крахмал $73,4 \pm 1,1$ %.

Исследования проводили с учетом требований международной организации по стандартизации ISO (ИСО): массовая доля влаги (ГОСТ 13586) на весовом влагомере MF-50 (AND); массовая доля белка (ГОСТ 10842) – на приборе K-424 (BUCHI Labortechnik AG); массовая доля крахмала (ГОСТ 10845) – с использованием поляриметра Polatron-N (Schmidt Haensch).

Для проведения исследований во ВНИИ крахмалопродуктов [7] разработана и изготовлена установка ПДУ-380 для измельчения муки (рис. 1). Установка включает двухкамерный диспергатор 1, центробежный классификатор 5, фильтр 7 с вентилятором и сборником 11 лёгкой фракции, клапан 9 выгрузки и рециркуляции тяжёлой крупной фракции. Степень уноса лёгкой фракции зависит от регулируемой (11...18 м/с) окружной скорости крыльчатки классификатора и от разрежения, создаваемого вентилятором фильтра 7, что позволяет вести обработку с рециркуляцией грубой фракции муки.

¹Eggenmüller M. Secrets of protein enrichment in pulses and the challenge of digitalization. Starch Convention and Bioethanol and Bioconversion Technology Meeting. Detmold, 2021.

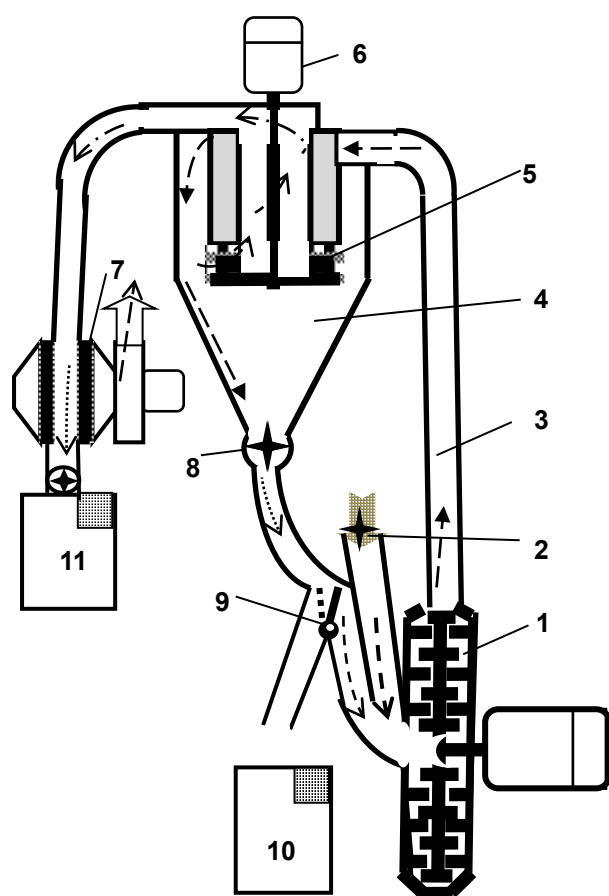


Рис. 1. Схема и фото установки ПДУ-380 для измельчения и пневмокласификации муки: 1 – диспергатор, 2 – патрубок загрузки муки, 3 – воздуховод, 4 – циклон, 5 – классификатор, 6 – электродвигатель, 7 – фильтр, 8 – шлюзовый затвор, 9 – клапан перекидной, 10 – сборник тяжелой фракции, 11 – сборник легкой фракции /

Fig. 1. Scheme and photo of the PDI-380 plant for grinding and air classification of flour: 1–dispersant, 2 – flour loading pipe, 3 – air duct, 4 – cyclone, 5 – air classifier, 6 – electric motor, 7 – filter, 8 – sluice gate, 9 – swing valve, 10 – heavy fraction collector, 11– fine fraction collector

Исследования проводили в 3-кратной повторности. Достоверность различий оценивали по t-критерию Стьюдента, различия считали достоверными при пороге надежностей $B1 = 0,95$ с уровнем статистической зависимости $p \leq 0,05$. Рассчитывали средние значения (M) и ошибки средних значений ($\pm m$). Для графического построения трехмерных зависимостей полученных результатов использована программа TableCurve 3D.

Область исследований. Для оценки эффективности измельчения крахмалсодержащего сырья и пневмокласификации муки предложен метод определения выхода тяжелой фракции и содержания в ней крахмала от доли легкой фракции и содержания в ней крахмала, исходя из равенства:

$$Q_o k_o = Q_f \cdot k_f + Q_t k_t, \quad (1)$$

где Q_o – масса исходной муки; k_o – содержание крахмала в исходной муке; Q_f – доля легкой фракции; k_f – содержание крахмала в легкой фракции; Q_t – доля тяжелой фракции; k_t – содержание крахмала в тяжелой фракции определится:

$$k_t = (Q_o \cdot k_o - Q_f \cdot k_f) / Q_o - Q_f. \quad (2)$$

При постоянных значениях Q_o k_o содержание крахмала в тяжелой фракции k_t полностью определится выходом легкой фракции Q_f и содержанием в ней крахмала k_f . При содержании в исходной диспергированной муке 75 % крахмала распределение его по тяжелой и легкой фракциям при граничных условиях: $10 < Q_f < 30$ % и $60 > k_f > 10$ имеет вид, представленный на рисунке 2, из которого следует, что максимальное значение содержания крахмала в тяжелой фракции более 85 % может

быть достигнуто при уносе лёгкой фракции >30 % и содержании крахмала в ней < 40 %, что определяет условия проведения опытов и

исходные требования к параметрам рабочих органов диспергатора и классификатора муки.

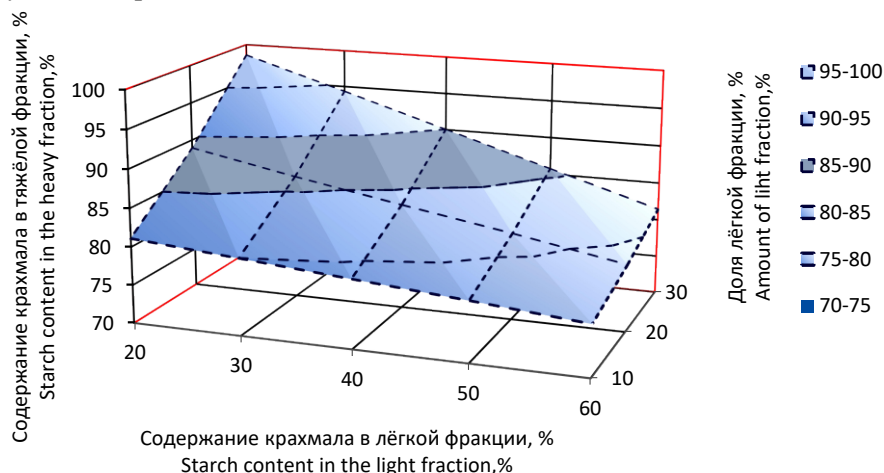


Рис. 2. Прогнозируемое распределение крахмала в тяжёлой и лёгкой фракциях при пневмоклас- сификации диспергированной муки /

Fig. 2. The predicted distribution of starch in the heavy and light fractions in the air classification of dispersed flour

Результаты и их обсуждение. Влияние числа стадий диспергирования и пневмоклас- сификации ржаной муки на разделение тяжё- лой и лёгкой фракций. На экспериментальной установке ПДУ-380 (рис. 1) с установленными параметрами окружной скорости ударных органов ротора диспергатора 90 м/с и крыль- чатки ротора классификатора 15 м/с порция муки ($Q_o = 500$ г) с содержанием крахмала $k_o = 73$ % загружалась в диспергатор с произ- водительностью 150 г/мин, затем диспергиро- ванная мука в виде воздушной смеси по тру- бопроводу выдувалась в разгрузочный циклон с классификатором 5, верхний сход которого Q_f собирался в фильтре 7 как белковая фракция, в которой определяли содержание крахмала k_f , а нижний сход Q_i из циклона 4, через шлюзо- вый раствор 8 и перекидной клапан 9 соби-рался в ёмкость 10 и, после взвешивания и отбора пробы для определения содержания крахмала k_i , снова загружался в диспергатор на второй помол, затем процесс диспергирования и клас- сификации со взвешиванием и отбором проб повторялся 5 раз. Полученные результаты по содержанию крахмала во фракциях приведены в таблице 1.

При анализе распределения масс фрак- ций отмечается падение выхода лёгкой фрак- ции с 26,2 до 3,7 %, соответственно и умень- шение выхода тяжёлой фракции. Из резуль- татов опытов следует, что для получения высо- кокрахмалистой фракции муки на установке

ПДУ-380 достаточно трёхкратной рецирку- ляции тяжёлой фракции.

Для определения эффективности разде- ления диспергированной ржаной муки прове- дена серия опытов планируемого трёхфактор- ного эксперимента при изменяемых парамет- рах измельчения муки, определяемых скоро- стью рабочих органов диспергатора (V_d от 80 до 100 м/с) и классификатора (V_k от 13 до 17 м/с) при времени измельчения 60 с и рециркуляции тяжёлой фракции с анализом состава лёгкой Q_f и тяжёлой Q_i фракций и содержания в них крахмала (k_i , k_f) и белка (b_i , b_f). Результаты опытов представлены в таблице 2.

С использованием программы Table- Curve 3D получены зависимости выхода тяжё- лой фракций Q_i и содержания в них крахмала k_i от независимых переменных V_d , V_k , пред- ставленных на рисунках 3 и 4.

Максимальный выход тяжёлой фракций Q_i достигается при минимальной скорости ротора диспергатора 80 м/с и максимальной скорости крыльчатки классификатора 17 м/с, и в заданном диапазоне изменения скоростей выражается формулой:

$$Q_i = 178,9 - 1,633 \cdot V_d + 2,583 \cdot V_k. \quad (3)$$

В то время как максимальное содержание крахмала в тяжёлой фракции при $V_i = 100$ м/с и $V_k = 13$ м/с составляет:

$$k_i = 66,85 + 0,263 \cdot V_d - 0,383 \cdot V_k. \quad (4)$$

Таблица 1 – Изменение содержания крахмала во фракциях ржаной муки в зависимости от стадий диспергирования и пневмокласификации при массе исходной муки (Q_0) 500 г и содержании в ней крахмала (k_0) 365 г / Table 1 – Changes in the starch content in rye flour fractions depending on the number of dispersion and air classification stages for sample mass Q_0 -500g with starch content k_0 – 365g

Стадии диспергирования и пневмокласификации / Dispersion and air classification stages	Масса продукта нижнего схода с циклона, $Q_l(z)$ / Mass of the product of the lower descent from the cyclone, $Q_l(g)$	Массовая доля крахмала в продукте нижнего схода с циклона, $k_l(z)$ / Mass fraction of starch in the product of the lower descent from the cyclone, $k_l(g)$	Выход лёгкой фракции, % / Light fraction yield, %	Масса продукта верхнего схода с циклона, собранного на фильтре, $Q_f(z)$ / Mass of the product of the upper descent from the cyclone collected on the filter, $Q_f(g)$	Массовая доля крахмала в продукте верхнего схода с циклона, $k_f(z)$ / Mass fraction of starch in the product of the upper descent from the cyclone, $k_f(g)$
1	396±27	308±13	26,2±1,3	104,2±6,8	57,1±1,9
2	330±21	264±10	20,3±1,4	66,7±7,5	38,0±1,5
3	300±17	246±15	10,1±1,0	30,5±6,2	18,5±1,3
4	280±15	235±12	7,1±0,8	20,4±5,3	12,8±1,1
5	270±17	229±11	3,7±0,4	10,9±4,1	7,3±0,6

Таблица 2 – Аналитические характеристики крахмальной и белковой фракций ржаной муки в зависимости от окружной скорости роторов диспергатора и пневмокласификатора / Table 2 – Analytical characteristics of starch and protein fractions of rye flour depending on the tangential speed of the dispersant rotor and the air classifier

№ опыта / No. of experiment	V_d	V_k	k_t	b_t	Q_t	k_f	b_f	Q_f
1	80	13	83,0±6,3	6,9±0,2	80,2±2,7	41,8±2,7	33,0	19,8
2		15	82,0±5,1	7,2±0,2	88,1±2,1	41,6±0,8	33,1±1,1	11,9±2,1
3		17	81,5±6,0	7,3±0,2	92,4±3,3	41,4±0,9	33,2±1,0	7,6±3,3
4	90	13	85,7±3,6	6,3±0,2	65,5±1,9	44,4±0,7	32,0±0,8	34,5±1,9
5		15	84,9±5,8	6,7±0,2	72,8±2,3	42,3±0,7	32,6±1,1	27,2±2,3
6		17	83,8±4,4	6,8±0,2	77,1±3,7	41,9±0,8	32,8±1,2	22,9±3,7
7	100	13	88,0±4,3	5,4±0,2	50,5±2,1	60,4±0,6	23,5±0,9	49,5±2,1
8		15	87,5±2,9	5,6±0,2	55,3±2,5	54,5±0,7	24,9±1,1	44,7±2,5
9		17	86,8±5,1	5,9±0,2	57,6±2,4	51,3±0,9	27,2±1,3	42,4±2,4

Примечание: V_d – окружная скорость ротора диспергатора, м/с; V_k – окружная скорость ротора пневмокласификатора, м/с; k_t – массовая доля крахмала в тяжёлой фракции, % СВ; b_t – массовая доля белка в тяжёлой фракции, % СВ; Q_t – массовая доля тяжёлой фракции, % к исходной массе муки; k_f – массовая доля крахмала в лёгкой фракции, % СВ; b_f – массовая доля белка в легкой фракции, % СВ; Q_f – массовая доля легкой фракции, % к исходной массе муки /

Note: V_d – is the tangential speed of the dispersant rotor, m/s; V_k – is the tangential speed of the air classifier rotor, m/s; k_t – is the mass fraction of starch in the heavy fraction, % of dry matter; b_t – is the mass fraction of protein in the heavy fraction, % of dry matter; Q_t – is the mass part of the heavy fraction, % of the initial mass of flour; k_f – is the mass part of starch in the light fraction part, % of dry matter; b_f – is the mass part of protein in the light fraction, % of dry matter; Q_f – is the mass part of the light fraction, % of the initial mass of flour.

Максимальное содержание крахмала в тяжёлой фракции составило 88 % при времени измельчения и пневмокласификации муки 60 с, окружной скорости ротора диспергатора 100 м/с и ротора классификатора 13 м/с при выходе тяжёлой (крахмалистой) фракции 50,5 %. Минимальное содержание крахмала

в лёгкой фракции составило 41,4 % при времени диспергирования и пневмокласификации муки 60 с, окружной скорости ротора диспергатора 80,0 м/с и ротора классификатора 17 м/с, выход лёгкой фракции составил 7,6 % от общей массы муки.

$z = a + bx + cy$
 $r^2 = 0.99146021$ DF Adj $r^2 = 0.98633634$ FitStdErr = 1.5898987 Fstat = 348.2967
 $a = 178.91667$ $b = -1.6333333$
 $c = 2.5833333$

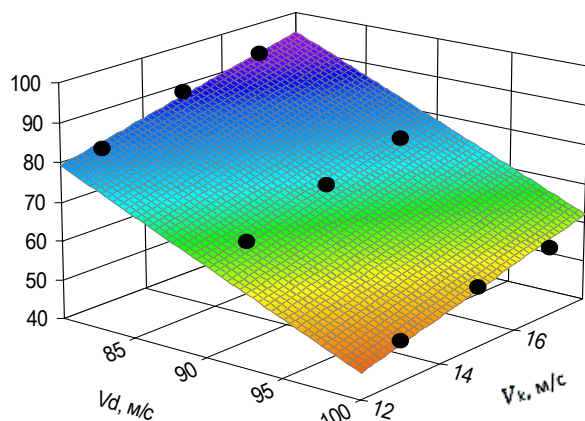


Рис. 3. Зависимость массовой доли тяжёлой фракции Q_b , % от окружной скорости ротора диспергатора V_d , м/с и окружной скорости ротора пневмокласификатора V_k , м/с /

Fig. 3. Dependence of the mass part fraction of the heavy fraction Q_b , % on the tangential speed of the dispersant rotor V_d , m/s and the tangential speed of the rotor of the air classifier V_k , m/s

$z = a + bx + cy$
 $r^2 = 0.99588114$ DF Adj $r^2 = 0.99340983$ FitStdErr = 0.17638342 Fstat = 725.35714
 $a = 66.85$ $b = 0.26333333$
 $c = -0.38333333$

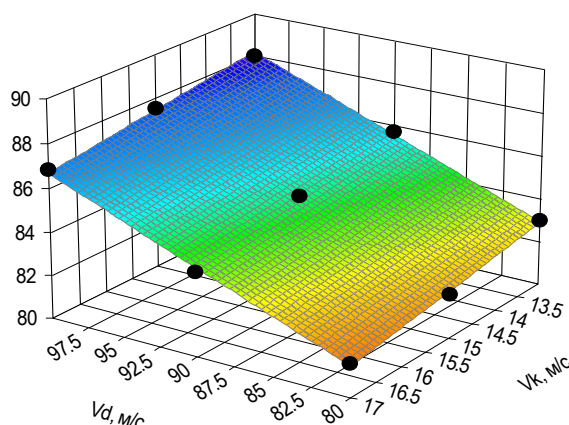


Рис. 4. Зависимость массовой доли крахмала в тяжёлой фракции k_t , % от окружной скорости ротора диспергатора V_d , м/с и окружной скорости ротора классификатора V_k , м/с /

Fig. 4. Dependence of the mass fraction of starch in the heavy fraction k_t , % on the tangential speed of the dispersant rotor V_d , m/s and the tangential speed of the air classifier rotor V_k , m/s.

Установленные зависимости выхода крахмальной фракции ржаной муки от параметров рабочих органов экспериментальной установки ПДУ-380 позволяют получить высококрахмалистую ржаную муку с заданным выходом 70...60 % и содержанием крахмала 83...88 %, что соответствует прогнозируемым результатам планируемого эксперимента с использованием метода определения эффективности разделения тяжёлой и лёгкой фракций по содержанию в них крахмала (рис. 2).

Из полученных данных следует, что теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены результаты опытов по разделению массы исходной ржаной муки на тяжёлую

крахмальную и лёгкую белковую фракции с заданным соотношением крахмала и белка.

Получены характеристики крахмальной и белковой фракций ржаной муки в сравнении с исходной мукой: по белизне, растворимости, содержанию растворимых веществ и золы. Отмечено более высокое содержание растворимых веществ, золы в белковой фракции. Содержание золы и растворимых веществ в белковой фракции более чем в 3 раза больше, чем в крахмальной. Растворимость и набухаемость диспергированной высококрахмалистой и исходной муки определяли при 20 °C в течение суток. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная оценка физико-химических свойств диспергированной и исходной ржаной муки / Table 3 – Comparative assessment of the physico-chemical properties of the dispersed and initial rye flour

Продукт / Product	Массовая доля / Mass fraction		Белизна муки, ед. приб. / The whiteness of flour, units
	зола, % на СВ / of ash, % on dry matter	растворимых веществ, % / of soluble substances, %	
Исходная мука / Raw flour	2,2	8	74,4±0,1
Высококрахмалистая фракция муки / High-starch flour fraction	0,5±0,1	7,0±1,4	81,0±0,1
Белковая фракция муки / Protein fraction flour	1,8±0,6	18,6±3,3	72±0,2

По показателям растворимости и набухаемости высококрахмалистая мука не отличается от исходной. Наибольшее значение белизны (81,0 ед. приб.) у высококрахмалистой фракции, в ней меньше содержится белковых, минеральных веществ и мелкой мезги, чем в исходной муке.

Высококрахмальные фракции, полученные при диспергировании и пневмокласификации ржаной муки, являются перспективным сырьём для получения набухающих крахмалопродуктов и мальтодекстринов [17].

Выводы. Для оценки эффективности измельчения и пневмокласификации муки крахмалсодержащего сырья предложен метод по установлению зависимости доли тяжёлой фракции и содержания в ней крахмала от доли выхода лёгкой фракции и содержания в ней крахмала. Теоретически максимальное значение содержания крахмала в тяжёлой фракции более 85 % может быть достигнуто при уносе

лёгкой фракции 30 % и содержании крахмала в ней < 40 %.

При многократном диспергировании и пневмокласификации тяжёлой фракции ржаной муки отмечается падение выхода лёгкой фракции в 5 раз и повышение в ней относительного содержания крахмала, что связано с дроблением крупных зёрен крахмала, поэтому для получения высококрахмалистой фракции ржаной муки достаточно трёхкратной рециркуляции тяжёлой фракции.

Высокобелковую ржаную муку с массовой долей белка до 28 % рекомендовано использовать в хлебопечении, а крахмальную ржаную муку с массовой долей крахмала 85 % целесообразно переработать на модифицированные набухающие крахмалопродукты, и при ферментативном гидролизе крахмала можно производить мальтодекстрин и кормовой углеводно-белковый продукт, что экономически более выгодно, чем из кукурузной муки и кукурузного крахмала.

Список литературы

1. Pelgrom P. J. M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. Method Development to Increase Protein Enrichment During Dry Fractionation of Starch-Rich Legumes. Food and Bioprocess Technology. 2015;8(7):1495-1502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1513-0>
2. Панкратов Г. Н., Мелешкина Е. П., Витол И. С., Кандроков Р. Х. Актуальные направления технологического развития мукомольной отрасли. Пищевая промышленность. 2017;(8):44-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29851470>
3. Gómez M., Martínez M. M. Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. Journal of Cereal Science. 2015; 67(7):67-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.009>
4. Silventoinen P., Sipponen M. H., Holopainen U., Poutanen K. Use of air classification technology to produce protein-enriched barley ingredients. Journal of Food Engineering. 2018;222:169-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.016>
5. Martín-García B., Verardo V., Cerio E. D., Gómez-Caravaca A. M., Marconi E., Caboni M. F. Air classification as a useful technology to obtain phenolics-enriched buckwheat flour fractions. LWT-Food Science and Technology. 2021;150:111893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111893>
6. Rempel C., Geng X., Zhanga Y. Industrial scale preparation of pea flour fractions with enhanced nutritive composition by dry fractionation. Food Chemistry. 2019;276:119-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.003>

7. Xing Q., Utami D. P., Dematthey M. B., Xing Q., Dea Anisa Putri D. A., Dematthey M. B. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;66:102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>
8. Schutyser M. A. I., Pelgrom P. J. M., van der Goot A. J., Boom R. M. Dry fractionation for sustainable production of functional legume. *Trends in Food Science & Technology*. 2015;45(2):327-335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.013>
9. Mayer-Laigle C., Barakat A., Barron C., Delenne J., Frank X., Mabilie F., Sadoudi A., Samson M.-F., Lullien-Pellerin V. DRY biorefineries: Multiscale modeling studies and innovative processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018;46:131-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.006>
10. Khan K., Shrewry P. R. Wheat: Chemistry and Technology. AACC International, Inc. USA, 2016. pp. 119-152.
11. Андреев Н. Р., Ковалёнок В. А., Носовская Л. П., Адикаева Л. В., Гольдштейн В. Г. Изучение процесса пневмокласификации гороховой муки на экспериментальной установке. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2020;(11):43-48. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32330880>
12. Смирнов С. О., Урубков С. А., Невская Е. В. Разработка технологии разделения тритикалевой муки на белковые и углеводные фракции при использовании центробежно-роторного пневмокласификатора. Роль тритикале в стабилизации производства зерна, кормов и технологии их использования: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. Агротехника, кормопроизводство, физиология, технология и продукты переработки зерна. Ростов-на-Дону: изд-во Юг, 2016. С. 217-234. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27324628&selid=27324705>
13. Андреев Н. Р., Носовская Л. П., Адикаева Л. В., Карпенко Т. Р. Разделение зерновой муки на крахмалистую и белковую фракции пневмокласификацией. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(11):108-111. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24998935>
14. Gomez-Caravaca A. M., Verardoc V., Candigliota T., Marconi E., Carretero A. S., Fernández-Gutiérrez A., Caboni M. F. Use of air classification technology as green process to produce functional barley flours naturally enriched of alkylresorcinols, β -glucans and phenolic compounds. *Food Research International*. 2015;73:88-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.02.016>
15. Кирсанов В. А., Бердник В. М., Кирсанов М. В., Коломиец Р. В. Расчет технологических и конструктивных параметров пневмокласификатора сыпучих материалов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2017;(4):81-85. DOI: <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-4-81-85>
16. Assatory A., Vitelli M., Rajabzadeh A. R. Dry Fractionation Methods for Plant Protein, Starch and Fiber Enrichment: A Review. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:340-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.006>
17. Ананских В. В., Шлеина Л. Д. Мальтодекстрины из крахмалосодержащего сырья, их качество и использование в отраслях пищевой промышленности. *Кондитерское и хлебопекарное производство*. 2018;(7-8):50-52. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35729600>

References

1. Pelgrom P. J. M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. Method Development to Increase Protein Enrichment During Dry Fractionation of Starch-Rich Legumes. *Food and Bioprocess Technology*. 2015;8(7):1495-1502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1513-0>
2. Pankratov G. N., Meleshkina E. P., Vitol I. S., Kandrov R. Kh. *Aktual'nye napravleniya tekhnologicheskogo razvitiya mukomol'noy otrasli*. [Current trends of technological development of the production of milling industry and food processing industry]. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*. 2017;(8):44-49. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29851470>
3. Gómez M., Martínez M. M. Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *Journal of Cereal Science*. 2015; 67(7):67-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.009>
4. Silventoinen P., Sipponen M. H., Holopainen U., Poutanen K. Use of air classification technology to produce protein-enriched barley ingredients. *Journal of Food Engineering*. 2018;222:169-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.016>
5. Martín-García B., Verardo V., Cerio E. D., Gómez-Caravaca A. M., Marconi E., Caboni M. F. Air classification as a useful technology to obtain phenolics-enriched buckwheat flour fractions. *LWT - Food Science and Technology*. 2021;150:111893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111893>
6. Rempel C., Geng X., Zhang Y. Industrial scale preparation of pea flour fractions with enhanced nutritive composition by dry fractionation. *Food Chemistry*. 2019;276:119-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.003>

7. Xing Q., Utami D. P., Dematthey M. B., Xing Q., Dea Anisa Putri D. A., Dematthey M. B. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;66:102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>
8. Schutyser M. A. I., Pelgrom P. J. M., van der Goot A. J., Boom R. M. Dry fractionation for sustainable production of functional legume. *Trends in Food Science & Technology*. 2015;45(2):327-335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.013>
9. Mayer-Laigle C., Barakat A., Barron C., Delenne J., Frank X., Mabilhe F., Sadoudi A., Samson M.-F., Lullien-Pellerin V. DRY biorefineries: Multiscale modeling studies and innovative processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018;46:131-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.006>
10. Khan K., Shrewry P. R. Wheat: Chemistry and Technology. AACC International, Inc. USA, 2016. pp. 119-152.
11. Andreev N. R., Kovalenok V. A., Nosovskaya L. P., Adikaeva L. V., Gol'dshteyn V. G. *Izuchenie protsessa pnevmoklassifikatsii gorokhovoy muki na eksperimental'noy ustanovke*. [The study of the process of air classification of pea flour in a pilot plant]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2020;(11):43-48. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32330880>
12. Smirnov S. O., Urubkov S. A., Nevskaya E. V. *Razrabotka tekhnologii razdeleniya tritikalevoy muki na belkovye i uglevodnye fraktsii pri ispol'zovanii tsentrobezno-rotornogo pnevmoklassifikatora*. [Development of a technology for separating triticale flour into protein and carbohydrate fractions using a centrifugal-rotary pneumatic classifier]. *Rol' tritikale v stabilizatsii proizvodstva zerna, kormov i tekhnologii ikh ispol'zovaniya: mat-ly. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [The role of triticale in the stabilization of grain production, feed and technology of their use: Proceedings of the International scientific and practical Conference]. Part. 2. *Agrotekhnika, kormoproizvodstvo, fiziologiya, tekhnologiya i produkty pererabotki zerna*. [Agrotechnics, feed production, physiology, technology and grain processing products]. Rostov-na-Donu: izd-vo Yug, 2016. C. 217-234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27324628&selid=27324705>
13. Andreev N. R., Nosovskaya L. P., Adikaeva L. V., Karpenko T. R. *Razdelenie zernovoy muki na krakhdymalistuyu i belkovuyu fraktsii pnevmoklassifikatsiyey*. [Separation of grain flour to protein and starch fraction by pneumatic sorting]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2015;29(11):108-111. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24998935>
14. Gomez-Caravaca A. M., Verardoc V., Candigliota T., Marconi E., Carretero A. S., Fernández-Gutiérrez A., Caboni M. F. Use of air classification technology as green process to produce functional barley flours naturally enriched of alkylresorcinols, β -glucans and phenolic compounds. *Food Research International*. 2015;73:88-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.02.016>
15. Kirsanov V. A., Berdnik V. M., Kirsanov M. V., Kolomiets R. V. *Raschet tekhnologicheskikh i konstruktivnykh parametrov pnevmoklassifikatora sypuchikh materialov*. [Calculation of technological and construction parameters of pneumatic classifier bulk materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* = Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region. Technical Sciences Series. 2017;(4):81-85. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-4-81-85>
16. Assatory A., Vitelli M., Rajabzadeh A. R. Dry Fractionation Methods for Plant Protein, Starch and Fiber Enrichment: A Review. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:340-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.006>
17. Ananskikh V. V., Shleina L. D. *Mal'todekstriny iz krakhdymalosoderzhashchego syr'ya, ikh kachestvo i ispol'zovanie v otraslyakh pishchevoy promyshlennosti*. [Maltodextrins from starch-containing raw materials, their quality and use in the food industry]. *Konditerskoe i khlebopekarnoe proizvodstvo*. 2018;(7-8):50-52. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35729600>

Сведения об авторах

✉ **Андреев Николай Руфеевич**, член-корреспондент РАН, доктор техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniik@arrisp.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8312-8135>

Гольдштейн Владимир Георгиевич, кандидат техн. наук, зав. отделом, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniik@arrisp.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Коваленок Владимир Александрович, доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1742-7695>

Носовская Лилия Петровна, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0973-0408>

Адикаева Лариса Владимировна, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3858-9071>

Мирошников Александр Анатольевич, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ул. Некрасова, д.11, д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5488-3900>

Information about the authors

✉ **Nikolay R. Andreev**, corresponding member of RAS, DSc in Engineering, chief researcher, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8312-8135>

Vladimir G. Goldstein, PhD in Engineering, leading researcher, Head of the Department, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Vladimir A. Kovalenok, DSc in Engineering, professor, leading researcher, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1742-7695>

Liliya P. Nosovskaya, senior researcher, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0973-0408>

Larisa V. Adikaeva, researcher, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3858-9071>

Alexander A. Miroshnikov, associate researcher, All-Russian Research Institute of Starch Products – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, st. Nekrasova, 11, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: vniiik@arrisp.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5488-3900>

✉ – Для контактов / Corresponding author