

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ДЕКОМПРЕССИОННОГО ЭФФЕКТА В РАБОЧЕМ ПРОЦЕССЕ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

А. А. Курочкин, Д. И. Фролов

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке интенсивности декомпрессионного эффекта в рабочем процессе одношнекового экструдера. Показано, что часть термической составляющей деструкционного воздействия на крахмал обрабатываемого сырья может быть заменена на декомпрессионный, обусловленный выходом экструдата из области высоких давлений в тракте машины в область пониженного давления за ее пределами. Получена математическая модель, позволяющая анализировать и прогнозировать содержание декстринов в экструдате в зависимости от его температуры в зоне фильеры шнековой части машины и давления в вакуумной камере модернизированного экструдера.

Ключевые слова: крахмал, экструдат, пшеница, декомпрессионный эффект, экструдер, вакуумная камера.

Введение

Уникальное значение термопластической экструзии для пищевых технологий связано в первую очередь с ее широкими возможностями в преобразовании обрабатываемых сред – полисахаридов, белков, смеси белков с полисахаридами и т.д. При этом основным компонентом растительного сырья, привлекаемого в качестве объекта экструзионной обработки, является крахмал.

По данным многочисленных исследований в процессе термопластической обработки полисахаридов не только разрушается их структура, но и происходит деструкция молекул крахмала, что способствует изменению физико-химических свойств получаемого продукта.

Обычно считается, что в экструзионном процессе крахмалсодержащего сырья значение термической и механической составляющих не одинаково, что и нашло отражение в выводах работ отдельных ученых.

Например, выделяя роль термической составляющей экструзионного процесса, ряд исследователей установили возможность регулирования содержания водорастворимых веществ в экструдате путем изменения температуры экструзионного процесса [1, 4, 20, 21].

В другой группе работ отмечается, что наиболее существенные изменения крахмальных зерен происходят в момент выхода экструдированного сырья из фильеры экструдера. Сторонники этого научного направления считают, что в процессе экструзионной обработки зерна именно в момент декомпрессии снижается общее содержание крахмала в связи с расщеплением амилозы и амилопектина и повышается количество олигосахаридов и декстринов. Декстринизация крахмала в этом случае обуславливает уменьшение плотности экструдированного материала и образование микропористой структуры, что и наблюдалось при анализе органолептических показателей экструдата [2, 5–11, 13–17, 22].

Таким образом, на основании выполненных ранее исследований можно сделать вывод о том, что экструзионная обработка растительного сырья сопровождается интенсивным комплексным воздействием на крахмал, в результате чего происходит как термическая, так и механическая деструкция крахмальных зерен и полимеров. При этом одним из критериев, достаточно полно отражающих глубину деструкции крахмала при экструзионной обработке зерна, является показатель содержания декстринов – промежуточных продуктов расщепления крахмала [3, 18, 19].

Цель исследования – оценить влияние декомпрессионного эффекта в рабочем процессе одношнекового экструдера на степень деструкции крахмала обрабатываемого сырья.

Задачи исследования – определить экспериментальным путем влияние термической и декомпрессионной составляющей экструзионного процесса на содержание декстринов в экструдате зерна пшеницы.

Объекты и методы исследований

Эксперименты выполнялись с помощью одношнекового пресс-экструдера, модернизированного согласно патенту №2561934 RU на изобретение «Экструдер с вакуумной камерой» [12].

Температура экструдата в зоне фильеры внутреннего тракта машины регистрировалась с помощью термодатчика, а ее регулирование осуществлялось за счет перемещения задвижки матрицы, влияющей на площадь сечения выгрузного отверстия фильеры. Частота вращения шнека пресса-экструдера составляла $7,5 \text{ с}^{-1}$.

Определение декстринов проводили спектрофотометрическим методом в модификации М.П. Попова и Е.Ф. Шаненко.

Объект исследования – зерно пшеницы сорта Саратовская 36 влажностью 14%. Масса 1000 семян равнялась 34,2 г; содержание крахмала и декстри-

нов соответственно – 52,6 и 0,22% на 100 г продукта.

В качестве исследуемых были выбраны следующие факторы: температура экструдата в зоне фильеры внутреннего тракта экструдера – X_1 (°C), давление воздуха в вакуумной камере экструдера, МПа – X_2 (%).

За критерий качества полученного экструдата было принято содержание в нем декстринов в расчете на 100 г продукта D (%).

Зерно пшеницы экструдировали в течение 15...20 с при температуре 100...120 °C с последующим воздействием на выходящий из фильеры матрицы экструдера продукт атмосферным или пониженным давлением. Эксперимент проводился в трехкратной повторности. В табл. 1 представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Результаты и их обсуждение

Статистическая обработка экспериментальных данных была выполнена с помощью корреляцион-

но-регрессионного анализа в среде Microsoft Excel 2010 и Statistica 10. В результате была получена адекватная математическая модель второго порядка (1), описывающая зависимость массовой доли декстринов (D) от температуры экструдата в зоне фильеры (x_1), и величины давления воздуха в вакуумной камере экструдера (x_2):

$$D=23,4 - 0,12 \cdot x_1 + 0,001 \cdot x_1^2 - 162,7 \cdot x_2 + 320 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

Основные показатели полученной математической модели приведены в табл. 3.

Статистическая надежность полученной модели оценивалась на основании критерия Фишера, который позволяет проверить нулевую гипотезу о статистической незначимости параметров построенного регрессионного уравнения и показателя тесноты связи.

Фактическое значение F-критерия Фишера для полученного уравнения регрессии $F_p = 61,66$. Табличное значение F-критерия (F_T), по заданному уровню значимости ($\alpha = 0,05$) и числу степеней свободы (в пакете Statistica: $сс$ модели = 4, $сс$ остаток = 3) равно $F_T=9,12$. Поскольку $F_p > F_T$, то ну-

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервалы варьирования фактора
		нижний	нулевой	верхний	
Температура экструдата в зоне фильеры, °C	X_1	100	110	120	10
Давление воздуха в вакуумной камере экструдера, МПа	X_2	0,05	0,075	0,1	0,025

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Кодированные факторы		Натуральные факторы		Массовая доля декстринов, % на 100 г
	X_1	X_2	x_1	x_2	
1	-1	-1	100	0,05	13,6
2	1	-1	120	0,05	16,5
3	-1	1	100	0,1	8,7
4	1	1	120	0,1	10
5	-1	0	100	0,075	11,1
6	1	0	120	0,075	12,9
7	0	-1	110	0,05	15
8	0	1	110	0,1	9,2

Таблица 3 – Качественные показатели модели

Зависимая переменная	R	R ²	SS мод.	сс мод.	MS мод.	SS ост.	сс ост.	MS ост.	F	p
D	0,99	0,98	55,36	4	13,84	0,67	3	0,22	61,66	0,003

Примечания:

R – множественный коэффициент корреляции;
 R² – коэффициент детерминации;
 SS мод., SS ост. – сумма квадратов модели, ошибок;
 p – статистическая значимость.

сс мод., сс ост. – число степеней свободы модели, ошибок;
 MS мод., MS ост. – дисперсия модели, ошибок;
 F – F-критерий Фишера;

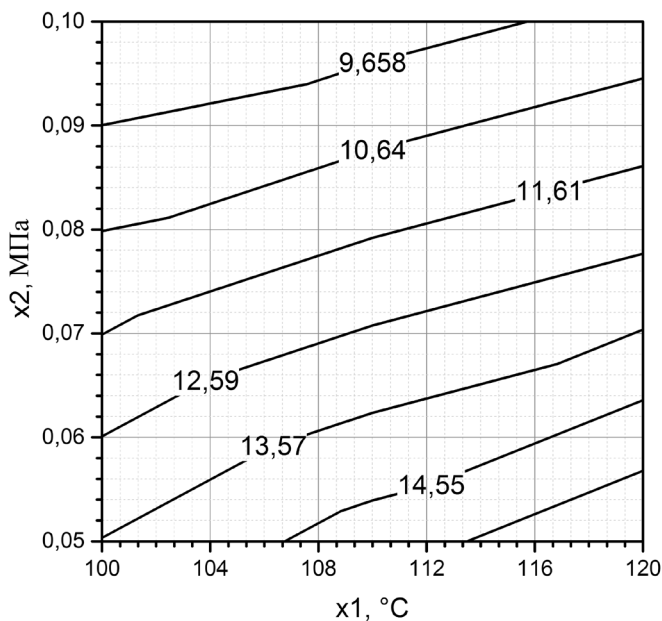


Рис. 1. Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость массовой доли декстринов (D) от температуры экструдата в зоне фильеры (x_1), и величины давления воздуха в вакуумной камере экструдера (x_2)

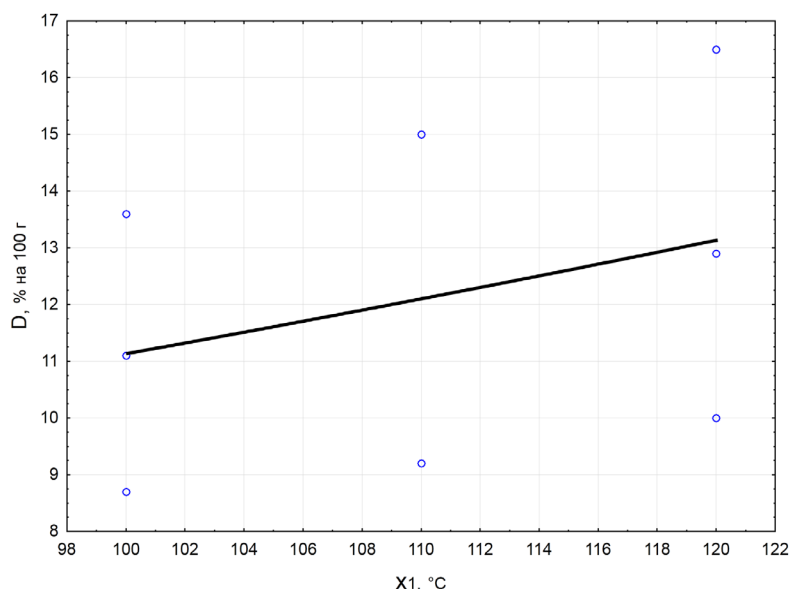


Рис. 2. График рассеяния с полиномиальной подгонкой функции D и X_1

левая гипотеза отвергается и регрессионное уравнение с его параметрами признается статистически значимым.

Анализ полученного уравнения (1) показывает следующее. В связи с тем, что эффект фактора x_2 показывает весьма высокую значимость, можно сделать предварительный вывод о том, что давление воздуха в вакуумной камере экструдера в исследуемых интервалах значений факторов оказывает наибольшее влияние на критерий оптимизации. Такой же вывод следует из рассмотрения его квадратичного эффекта.

Анализ поверхности отклика, проведенный с помощью двумерных сечений, показывает, что массовая доля декстринов зависит как от давления воздуха в вакуумной камере экструдера, так и температуры экструдата в зоне фильеры.

Графическая интерпретация данного уравнения представлена на рис. 1 (цифры показывают числовые значения массовой доли декстринов в отмеченных областях поверхности отклика).

Уравнение, описывающее зависимость изменения массовой доли декстринов (D) от температуры экструдата в зоне фильеры (x_1) можно представить в следующем виде

$$D = 5,1333 + 0,0267 \cdot x_1 + 0,0003 \cdot x_1^2 \quad (2)$$

Анализ уравнения (2) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением температуры экструдата в зоне фильеры массовая доля декстринов при прочих равных условиях достаточно заметно возрастает. При этом видно (рис. 2), что экспериментальные

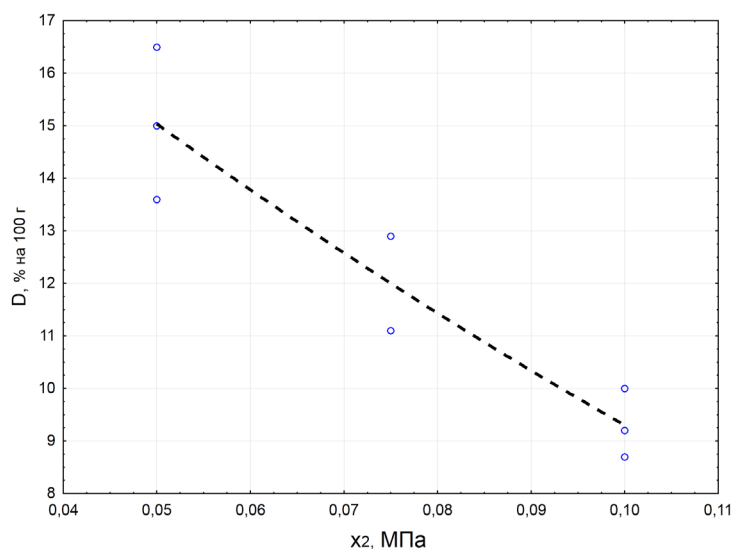


Рис. 3. График рассеяния с полиномиальной подгонкой функции D и X₂

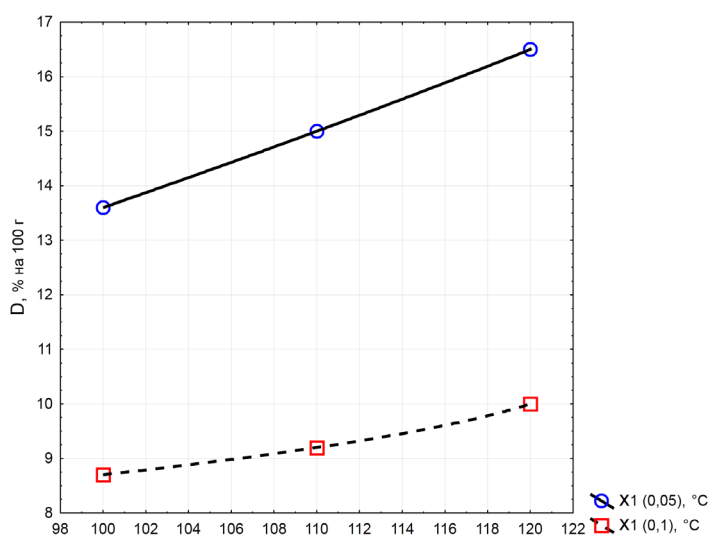


Рис. 4. Изменение массовой доли декстринов в зависимости от температуры экструдата в зоне фильеры при давлении в вакуумной камере 0,05 МПа и 0,1 МПа

данные демонстрируют сильную отрицательную корреляцию.

Аналитическую зависимость массовой доли декстринов (D) от давления воздуха в вакуумной камере экструдера (x₂) можно представить в виде уравнения (3), графическая интерпретация которого приведена на рис. 3.

$$D = 22,1 - 154,6667 \cdot x_2 + 266,6667 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что с уменьшением давления в вакуумной камере экструдера массовая доля декстринов при прочих равных условиях возрастает.

Связь массовой доли декстринов (D_(0,05) – при давлении в вакуумной камере 0,05 МПа и D_(0,1) – соответственно 0,1 МПа) и температуры экструдата в зоне фильеры, можно представить в виде уравнений (4) и (5):

$$D_{(0,05)} = 5,1 + 0,035 \cdot x_{1(0,05)} + 0,0005 \cdot x_{1(0,05)}^2 \quad (4)$$

$$D_{(0,1)} = 20,2 - 0,265 \cdot x_{1(0,1)} + 0,0015 \cdot x_{1(0,1)}^2 \quad (5)$$

Графики, характеризующие изменение массовой доли декстринов (D) в зависимости от температуры экструдата в зоне фильеры при давлении в вакуумной камере экструдера 0,05 МПа и 0,1 МПа, представлены на рис. 4.

Выводы

Как свидетельствуют полученные экспериментальные данные и приведенные графические зависимости, повышение массовой доли декстринов можно обеспечить как за счет увеличения температуры экструдированного сырья, а так и путем снижения давления воздуха на выходе экструдата из фильеры матрицы экструдера. Второй вариант позволяет обеспечить более бережное отношение к термолабильным ингредиентам обрабатываемого растительного сырья. Практическая реализация данной научной концепции связана с оснащением серийно выпускаемых экструдеров специальной вакуумной камерой.

Список литературы

1. Абрамов, О. В. Научное обеспечение процесса экструзии модельных средна основе крахмалсодержащего сырья и разработка высокоэффективного оборудования для его реализации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12/Абрамов Олег Васильевич. – Воронеж: 2009. – 48 с.
2. Воронина, П. К. Полифункциональный композит с повышенным содержанием пищевых волокон / П. К. Воронина, А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4. – С. 65–71.
3. Выгодин, В. Л. Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В. Л. Выгодин, В. Л. Касперович, Г. Б. Зинюхин, В. П. Попов, В. А. Буцко // Пищевая промышленность. – 1995. – № 7. – С. 4–5.
4. Карпов, В. Г. Разработка новых видов крахмалопродуктов экструзионным способом: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.05 / Карпов Владимир Георгиевич. М., 2000. – 48 с.
5. Курочкин, А. А. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 4. – С. 70–74.
6. Курочкин, А. А. Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении / Г. В. Шабурова, П. К. Воронина, А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 4. – С. 79–83.
7. Курочкин, А. А. Получение экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья с заданной пористостью / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 6 (22). – С. 109–114.
8. Курочкин, А. А. Системный подход к разработке экструдера для термовакуумной обработки экструдата / А. А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 17–21.
9. Курочкин, А. А. Теоретическое обоснование термовакуумного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 15–20.
10. Курочкин, А. А. Поликомпонентный экструдат на основе зерна пшеницы и семян расторопши пятнистой / А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4. – С. 76–81.
11. Научное обеспечение актуального направления в развитии пищевой термопластической экструзии / А. А. Курочкин, П. К. Воронина, В. М. Зимняков, А. Л. Мишанин, В. В. Новиков, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов. – Пенза, 2015. – 181 с.
12. Пат. 2561934 Российская Федерация, МПК А23Р 1/12, В29С 47/38. Экструдер с вакуумной камерой / Шабурова Г. В., Воронина П. К., Шабнов Р. В., Курочкин А. А., Авроров В. А. № 2014125348/13; заявл. 23.06.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 25. – 7 с.
13. Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование / Под ред. А. Н. Богатырева, В. П. Юрьева. – М.: Ступень, 1994. – 200 с.
14. Шабурова, Г. В. Белковый комплекс экструдированного ячменя / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, В. П. Чистяков, В. В. Новиков // Пиво и напитки. – 2007. – № 3. – С. 12.
15. Шабурова, Г. В. Экструдированный ячмень как компонент функциональных пищевых продуктов / Г. В. Шабурова, Е. В. Петросова, Т. В. Шленская, А. А. Курочкин // Пищевая промышленность. – 2012. – № 10. – С. 44–45.
16. Шабурова, Г. В. Повышение технологического потенциала несоложенных зернопродуктов / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, П. К. Воронина // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 1 (32). – С. 90–96.
17. Berglung, P. T. Physiochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals / P. T. Berglung, C. E. Fastnaught, E. T. Holm // Cereal. Chem. – 1994. – № 1. – P. 91–95.
18. Heldman, D. R. Principles of Food Processing / D. R. Heldman, R. W. Hartel. – Springer, 1997. – P. 278–281.
19. Linko, P. High-Temperature-Short-Time Extrusion Cooking / P. Linko, P. Colonna, C. Mercier // Advances in Cereal Science and Technology. Ed. Y. Pomeranz. St. Paul, USA. – 1981. – Vol. IV. – P. 145–235.
20. Melcion, I. P. La cnisson-extrusion dans le domaine alimentaire: principe, applications, perspectives / I. P. Melcion, P. Colonna // Revue de l'alimentation animale. – 1983. – No. 368. – P. 45–54.
21. Mercier, C. Veranderund der Struktur und Verdaulichkeit von Getreidestärke beim Extrudieren / C. Mercier // Getreide, Mehl und Brot. – 1980. – No. 34. – P. 52.
22. Sendra, J. M. Evaluation of the effects of yeast strain and fermentation conditions on the volatile concentration profiles of pilot plant lager beers / J. M. Sendra, Tobov, F. Pinaga, L. Izquierdo, S. V. Carbonell // Monatsschr. Brauwiss. – 1994. – 47. – № 10. – P. 316–321.

THE QUESTION OF THE EFFECT OF INCREASING DECOMPRESSION IN THE WORKFLOW A SINGLE SCREW EXTRUDER

A. A. Kurochkin, D. I. Frolov

The results of experimental studies evaluating the effect of the intensity of the decompression in the workflow a single screw extruder. It is shown that a part of the thermal component of the destruction effect on the treated raw starch can be replaced by the decompression caused extrudate output from the high-pressure path of the machine in a low pressure area outside. The mathematical model that allows to predict and analyze the content of dextrans in the extrudate, depending on the temperature in the die zone of the machine screw and the pressure in the vacuum chamber upgraded extruder.

Keywords: starch extrudate, wheat, compression effect extruder vacuum chamber.

References

1. Abramov, O.V. Scientific provision of the extrusion process modeling environments based on starchy raw materials and development of highly efficient equipment for its implementation: author. dis. ... d-RA tekhn. Sciences: 05.18.12/Abramov, Oleg. – Voronezh: 2009. – 48 p
2. Voronina, P.K. Multifunctional composite with a high content of dietary fiber /P. K. Voronina, A. A. Kurochkin // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2015. – No. 4. – P. 65–71.
3. Vygodin, V.L. Extrusion technique and technology: state and prospects /V. L. Vygodin, V.L. Kasperovich, G. B. Zinyukhin, V.P. Popov, V.A. Butsko // Food industry. – 1995. – No. 7. – S. 4–5.
4. Karpov, V.G. Development of new types of starch products by extrusion: author. dis. ... doctor. tech. Sciences: 05.18.05 / Vladimir G. Karpov. M., 2000. – 48 p
5. Kurochkin, A. A. the extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids / A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, I. D. Frolov, P.K. Voronina//Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2014. – No. 4. – S. 70–74.
6. Kurochkin, A. A. prospects for the use of extruded buckwheat in brewing and bread baking / G. V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D. I. Frolov // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2014. – No. 4. – Pp.79–83.
7. Kurochkin, A. A. production of extrudates starchy grain with a given porosity // A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, D.I. Frolov // XXI century: the past and challenges of the present plus. – 2014. – № 6 (22) . – Pp. 109–114.
8. Kurochkin, A. A. a Systematic approach to the development of the extruder for thermal vacuum processing of the extrudate / A. A. Kurochkin // Innovative technology. – 2014. – No. 4. – Pp. 17–21.
9. Kurochkin, A. A. the Theoretical justification of the thermal effect in the working process of the upgraded extruder / A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova, I. D. Frolov, P.K. Voronina// Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2015. – No. 3. – P. 15–20.
10. Kurochkin, A.A. Multicomponent extrudate on the basis of wheat and Thistle seed / A.A. Kurochkin, D. I. Frolov// Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2015. – No. 4. – P. 76–81.
11. Scientific support for current trends in the development of the edible thermoplastic extrusion / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, V.M. Zimnyakov, mishanin A. L., V.V. Novikov, G. V. Shaburova, D.I. Frolov. – Penza, 2015. – 181 p.
12. Pat. 2561934 Russian Federation, IPC OR 1/12, VS 47/38. Extruder with vacuum chamber /G. V. Shaburova, P.K. Voronina, Shabrov R. V., Kurochkin A. A., A. Avrorov, V. No. 2014125348/13; Appl. 23.06.2014; publ. 10.06.2015, bull. No. 25. – 7 S.
13. Thermoplastic extrusion: scientific bases, technology, equipment /ed. by A. N. Bogatyrev, V.P. Yuryev. – M.: Degree, 1994. – 200 p.
14. Shaburov, and G. V. Protein complex extruded barley / G. V. Shaburova, A.A. Kurochkin, V.P. Chistyakov, V. V. Novikov // Beer and drinks. – 2007. – No. 3. – S. 12.
15. Shaburov, and G. V. Extruded barley as a component of functional foods / G. V. Shaburova, E. V. Petrosova, T. V. Shlyonsky, A. A. Kurochkin // Food industry. – 2012. – No. 10. – Pp. 44–45.
16. Shaburov, and G. V. Improving the technological capacity of unmalted grain products // G. V. Shaburova, A. A. Kurochkin, P.K. Voronina // Technics and technology of food production. – 2014. – № 1 (32) . – Pp. 90–96.
17. Berglung, P.T. Physicochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals/ Berglung, P. T., C. E. Fastnaught, and E. T. Holm // Cereal. Chem. – 1994. – No. 1. – Pp. 91–95.

18. Heldman, D. R. Principles of Food Processing / D. R. Heldman, R. W. Hartel. – Springer, 1997. – P. 278–281.
19. Linko, P. High-Temperature-Short-Time Extrusion Cooking / Linko P., Colonna P., Mercier C. // Advances in Cereal Science and Technology. Ed. Y. Pomeranz. St. Paul, USA. – 1981. – Vol. IV. – P. 145–235.
20. Melcion, I. P. La cuisson-extrusion dans le domaine alimentaire: principe, applications, perspectives / I. P. Melcion, P. Colonna // Revue de l'alimentation animale. – 1983. – No. 368. – P. 45–54.
21. Mercier, C. Veränderung Verdaulichkeit der Struktur und beim Extrudieren von Getreidestärke / C. Mercier // Getreide, Mehl und Brot. – 1980. – No. 34. – P. 52.
22. Sendra, J. M. Evaluation of the effects of yeast strain and fermentation conditions on the volatile concentration profiles of pilot plant lager beers / J. M. Sendra, Tobov, F. Pinaga, L. Izquierdo, S. V. Carbonell // Monatsschr. Brauwiss. – 1994. – 47. – № 10. – P. 316–321.