

Зависимости свойств экструдатов из ячменя от регулируемых параметров обработки

Фролов Д.И., Лукьянова Е.А.

Аннотация. В статье рассматривается зависимость удельной механической энергии и физических свойств экструдатов ячменя (коэффициент расширения, насыпная плотность и твердость) от регулируемых параметров экструзионной обработки (температура на выходе из фильеры 120–150 °С, влажность сырья 20–24% и скорость вращения шнека 260–340 об/мин). В качестве статистического метода использовалась методология поверхности отклика. В качестве модели для подгонки экспериментальных данных использовалась модель полиномиальной регрессии второго порядка. Температура на выходе из фильеры и содержание влаги в сырье, а также взаимодействие между ними были факторами, которые больше всего повлияли на характеристики продукта. Была обнаружена значительная корреляция между твердостью и насыпной плотностью, твердостью и коэффициентом расширения, насыпной плотностью и коэффициентом расширения для экструдатов ячменя. Оптимальными характеристиками были определены высокая температура на выходе из фильеры, низкая влажность и средняя или высокая скорость шнека.

Ключевые слова: экструзия, ячмень, мука, экструдат.

Для цитирования: Фролов Д.И., Лукьянова Е.А. Зависимости свойств экструдатов из ячменя от регулируемых параметров обработки // Инновационная техника и технология. 2020. № 4 (25). С. 24–29.

Dependences of the properties of barley extrudates on the controlled processing parameters

Frolov D.I., Lukyanova E.A.

Abstract. The article examines the dependence of the specific mechanical energy and physical properties of barley extrudates (expansion coefficient, bulk density and hardness) on the adjustable parameters of extrusion processing (temperature at the exit from the die 120–150 °C, raw material moisture 20–24% and screw rotation speed 260–340 rpm). The response surface methodology was used as a statistical method. A second-order polynomial regression model was used as a model for fitting experimental data. The temperature at the outlet of the die and the moisture content of the raw materials, as well as the interaction between them, were the factors that most influenced the characteristics of the product. A significant correlation was found between hardness and bulk density, hardness and expansion coefficient, bulk density and expansion coefficient for barley extrudates. High temperature at the die outlet, low humidity and medium to high screw speed were determined to be optimal characteristics.

Keywords: extrusion, barley, flour, extrudate.

For citation: Frolov D.I., Lukyanova E.A. Dependences of the properties of barley extrudates on the controlled processing parameters. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.4 (25). pp. 24–29. (In Russ.).

Введение

Улучшение питательных характеристик продуктов и использование новых ингредиентов и технологий является актуальным в настоящее время

[1, 2]. Экструзионное приготовление - это относительно новый метод, используемый для производства многих различных видов пищевых продуктов, включая готовые к употреблению сухие завтраки, детское питание, супы быстрого приготовления, пе-

Таблица 1 – Исходные данные для удельной механической энергии (УМЭ), коэффициента расширения (КР), насыпной плотности (В) и твердости экструдатов ячменя

Т, °С	W, %	n, об/мин	Ячмень			
			УМЭ, кДж/кг	КР	В, г/см ³	Твердость, Н
120	20	260	453	2,3	0,424	613
120	24	340	432	2,4	0,441	473
135	22	300	332	3,2	0,335	412
120	20	340	567	2,8	0,372	459
110	22	300	442	2,2	0,467	551
135	25,4	300	316	3,7	0,34	548
150	20	340	340	1,8	0,258	634
135	22	300	369	3,9	0,307	454
135	18,6	300	459	4	0,279	461
150	24	260	432	4	0,159	429
135	22	300	367	3,2	0,286	544
135	22	367	442	3	0,204	400
135	22	300	332	3,1	0,277	417
135	22	300	332	3,7	0,274	442
150	20	260	453	1,8	0,278	519
150	24	340	216	4,4	0,106	295
120	24	260	432	2	0,443	509
160	22	300	221	3,1	0,103	276
135	22	233	442	2,3	0,348	470
135	22	300	332	3,2	0,29	417

ченье и другие, поскольку он улучшает усвояемость и биодоступность питательных веществ [3, 4, 5].

Как правило, желательными характеристиками конечного продукта являются высокая степень расширения, низкая объемная плотность и прочная текстура [6, 7]. Эти характеристики регулируются свойствами сырья и параметрами процесса экструзии, такими как скорость подачи и содержание влаги, диаметр и форма фильеры, температура, профиль шнека и скорость [8, 9, 10].

Ячмень является ценной культурой с диетической точки зрения благодаря высокому содержанию Р-глюкана. Р-глюкан может помочь снизить уровень холестерина в крови и контролировать уровень сахара в крови, так как он связывает холестерин и желчные кислоты, тем самым облегчая их выведение из организма [11].

Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы изучить влияние переменных экструзионной обработки: температуры на выходе из фильеры, влажности и скорости шнека, на удельную механическую энергию (УМЭ) и физические свойства (коэффициент расширения, объемная плотность и твердость) экструдатов из ячменя.

В качестве статистического метода использовалась методология поверхности отклика. В качестве модели для подгонки экспериментальных данных использовалась модель полиномиальной регрессии второго порядка.

Объекты и методы исследований

Ячменная мука была закуплена в продуктовой сети. Состав ячменной муки был следующим (на влажной основе): влажность 9,10%, золы 0,77%, белка 8,90%, жиры 0,95%, крахмала 66,7%.

При выполнении работы были использованы общепринятые стандартные методы исследований.

Все эксперименты по экструзии проводили с использованием одношнекового лабораторного экструдера ЭК-40 (диаметр шнека 40 мм) с использованием фильеры диаметром 3 мм. Влагосодержание муки определяли перед экструзией, а затем регулировали общую влажность экструдированной массы путем добавления воды в экструдер в соответствии с экспериментальной схемой. Перед взятием образца составы и условия экструзии оставляли для стабилизации в течение 10 мин. На основании предварительных испытаний экструдаты сушили в течение 5 минут при 105 °С в сушилке.

Центральное композиционное планирование эксперимента использовалось для оценки влияния переменных процесса экструзии на удельную механическую энергию и физические свойства экструдатов. Были добавлены дополнительные центральные точки, чтобы лучше измерить присущую изменчивость. Независимыми переменными были: температура на выходе из фильеры (Т) (120-150 °С), содержание влаги (W) (20-24 % в сыром виде) и скорость шнека (n) (260-340 об/мин). Исходные

Таблица 2 – Коэффициенты регрессии и оценки параметров модели удельной механической энергии (УМЭ), коэффициента расширения (КР), насыпной плотности (В) и твердости экструдатов ячменя

	УМЭ, кДж/кг	КР	В, г/см ³	Твердость, Н
Св.член	433,95	28,906	-1,821	585,099
T, °C	21,237	-0,049	0,026	21,314
T, °C ²	0,005	-0,002	0	-0,015
W, %	-147,938	-4,142	0,090	-68,580
W, % ²	5,085	0,024	0,002	6,982
n, об/мин	4,325	0,133	0,000	-2,495
n, об/мин ²	0,025	-0,000	0	0,003
T, °C*W, %	0,046	0,023	-0,002	-1,413
T, °C*n, об/мин	-0,092	-0,000	0	0,036
W, %*n, об/мин	-0,339	0,000	0,000	-0,205

Таблица 3 – Качественные показатели моделей

	Множест. R	Множест. R2	F	p
УМЭ, кДж/кг	0,975	0,951	21,609	0,000
КР	0,904	0,817	4,968	0,010
В, г/см ³	0,968	0,937	16,533	0,000
Твердость, Н	0,720	0,519	1,199	0,388

данные представлены в таблице 1. Скорость подачи поддерживалась постоянной на уровне 14 кг в час для всех экспериментов, как определено в предварительных испытаниях экструзии. Модели полиномиальной регрессии второго порядка были использованы для соответствия экспериментальным данным (уравнение 1).

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

где y - данные отклика, $x_1 - x_3$ - экспериментальные факторы, b_0 - константа, $b_1 - b_3$ - линейные коэффициенты, b_{11}, b_{22}, b_{33} - квадратичные коэффициенты, b_{12}, b_{13}, b_{23} - коэффициенты взаимодействия.

Программа Statistica 10 была использована для составления плана эксперимента, проведения статистического анализа и использовалась для разработки, оценки эффектов и получения поверхностей отклика.

Значения удельной механической энергии (УМЭ), были записаны после достижения устойчивого состояния.

Коэффициент расширения (КР) определяли как отношение между диаметром экструдатов (из-

меренным с помощью цифрового штангенциркуля) и диаметром отверстия фильеры экструдера (0,3 мм). Выбиралось среднее значение шести измерений.

Объемная плотность (В) определялась путем взвешивания количества экструдатов, необходимых для заполнения контейнера емкостью 500 мл, и выражалась в г/см³. Экструдаты добавляли в контейнер случайным образом, и контейнер несколько раз встряхивали во время заполнения. Когда экструдаты были более объемными, вместо них использовали контейнер объемом 1 л. Выбиралось среднее значение двух измерений для каждого условия обработки.

Твердость определяли путем измерения максимального усилия, необходимого для разрушения экструдатов. Выбиралось среднее значение не менее трех измерений.

Результаты и их обсуждение

Температура на выходе из фильеры и содержание влаги значительно влияли на удельную механическую энергию экструзии муки из ячменя ($p < 0,01$). Линейный эффект скорости вращения шнека был незначительным, но квадратичный эффект и взаимодействие с температурой на выходе из фильеры и содержанием влаги были значительными ($p < 0,05$).

Влажность больше всего повлияла на удельную механическую энергию. Поверхности отклика (рис.1) показали, что при низких температурах на выходе из фильеры увеличение содержания влаги в муке не оказывает влияния на удельную механическую энергию. Коэффициенты регрессии и соответствие моделей (p -значения) представлены в таблице 2.

Влажность и скорость шнека были факторами, влияющими на расширение больше всего (таблица 2). Квадратичный эффект температуры на выходе из фильеры на КР также был значительным ($p < 0,05$). Значения КР варьировались от 3,2 до 4,8. Более высокие значения расширения экструдатов ячменя были получены при низкой влажности и высокой скорости вращения шнека. Эти результаты согласуются с другими исследованиями [8].

На насыпную плотность экструдатов ячменя значительно ($p < 0,05$) влияли все факторы, включая все три члена взаимодействия (таблица 1), причем наиболее важным было содержание влаги. Значения находились в диапазоне от 45 до 148 г/см³. Согласно полученной модели (рис. 3), низкая влажность при относительно высокой температуре и средней или высокой скорости вращения шнека дает продукт с низкой объемной плотностью. Влияние взаимодействия между температурой на выходе из фильеры и содержанием влаги на насыпную плотность было очень значительным ($p < 0,01$).

На твердость влияли все три фактора, так как взаимодействие между температурой и скоростью

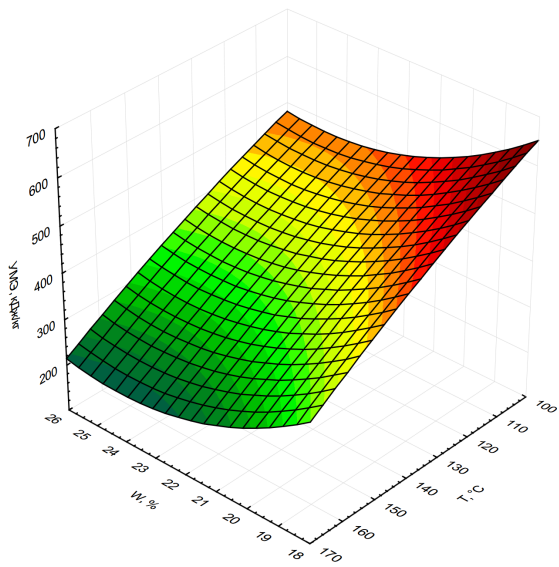


Рис. 1. Поверхность отклика для удельной механической энергии в зависимости от температуры на выходе из фильеры и содержания влаги для ячменной муки

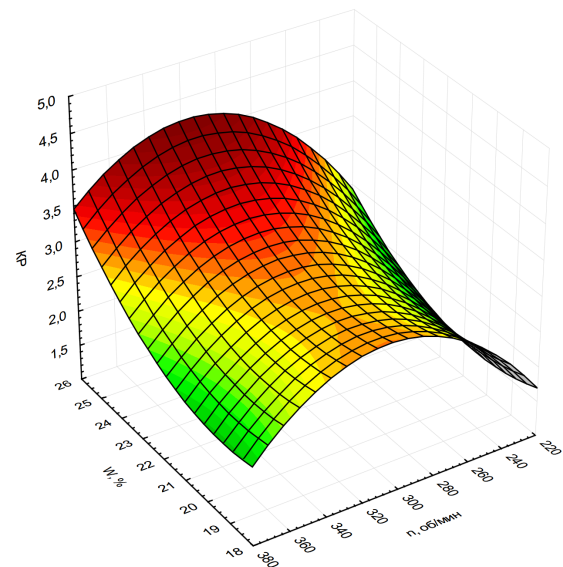
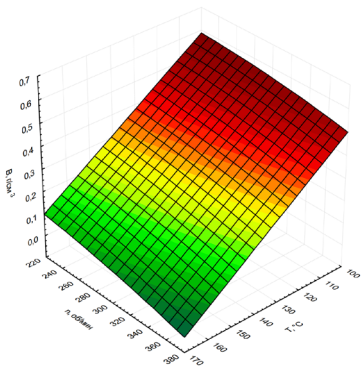
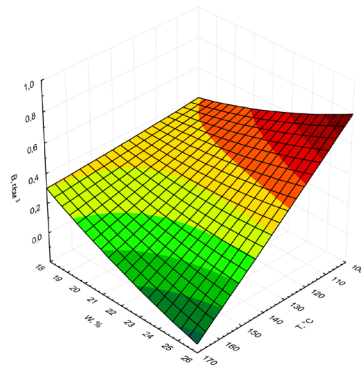


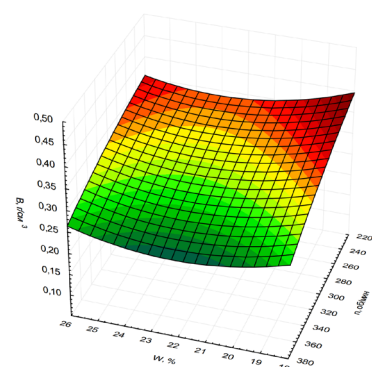
Рис. 2. Поверхность отклика степени расширения для экструдатов ячменя в зависимости от скорости вращения шнека и содержания влаги



а)

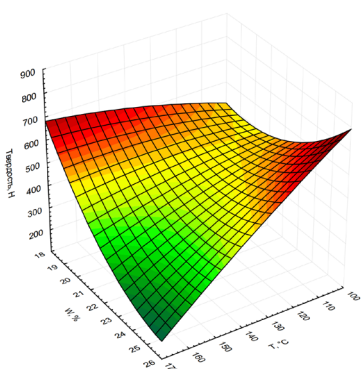


б)

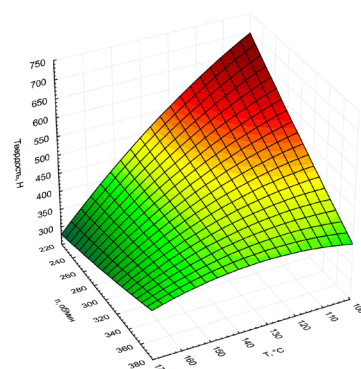


в)

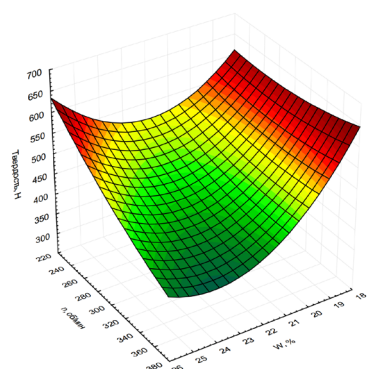
Рис. 3. Поверхность отклика насыпной плотности для экструдатов ячменя: а) в зависимости от температуры на выходе из фильеры и скорости вращения шнека; б) в зависимости от температуры и влажности на выходе из фильеры; в) в зависимости от скорости вращения шнека и влажности.



а)



б)



в)

Рис. 4. Поверхность отклика твердости экструдатов ячменя в зависимости от: а) температуры и влажности на выходе из фильеры; б) температуры на выходе из фильеры и скорости вращения шнека; в) скорости вращения шнека и влажности

вращения шнека также было значительным ($p < 0,05$) (таблица 1). Твердость экструдатов ячменя находилась в диапазоне от 184 до 312 Н. Поверхно-

сти отклика показали, что низкая влажность, высокая температура и скорость шнека от умеренной до высокой дают экструдаты ячменя с более низкими

значениями твердости (рис. 4). В настоящем исследовании значения содержания крахмала и белка для ячменной муки составляли 66,7 и 8,9%.

Значительная ($p < 0,05$) корреляция была обнаружена между твердостью и насыпной плотностью (положительная), твердостью и коэффициентом расширения (отрицательная), а также насыпной плотностью и коэффициентом расширения (отрицательная) для экструдатов ячменя. Эти результаты согласуются с другими исследованиями [4, 12]. Ученые сообщали о положительной корреляции между удельной механической энергией и индексом поперечного расширения экструдатов ячменя в зависимости от конфигурации шнека и сырья (ячменная мука и ячменная крупа).

Выводы

Было оценено влияние температуры на выходе из фильеры, содержания влаги и скорости шнека на удельную механическую энергию и физические свойства (коэффициент расширения, объемная плотность и твердость) экструдатов ячменя. Содержание влаги больше всего повлияло на удельную механическую энергию. Повышение температуры на выходе из фильеры и содержания влаги привело к снижению значений удельной механической энергии. Оптимальными характеристиками для экструдатов ячменя были определены высокая температура на выходе из фильеры, низкая влажность и средняя или высокая скорость шнека.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] Технологические аспекты регулирования выхода экстракта при получении пивного сусле / П.К. Гарькина, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020. Т. 8. № 2. С. 13–20.
- [3] Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов и пищевых волокон / А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 3 (42). С. 104–111.
- [4] Оптимизация состава зернопродуктов при получении пивного сусле с использованием экструдированного ячменя / Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Д.И. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 103–109.
- [5] Рациональные технологические параметры при производстве поликомпонентного композита на основе семян льна / В.М. Зимняков, О.Н. Кухарев, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Нива Поволжья. 2017. № 4 (45). С. 157–163.
- [6] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // Нива Поволжья. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [7] Теоретическое обоснование термовакuumного 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.
- [8] Потапов М.А., Фролов Д.И., Курочкин А.А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. Т. 5. № 4. С. 42–48.
- [9] Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 4. С. 94–99.
- [10] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [11] Liu R.H. Whole grain phytochemicals and health. J. Cereal Sci. 46: 207-219 (2007).
- [12] Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Нива Поволжья. 2014. № 30. С. 70–76.

References

- [1] Prospects for the use of extruded buckwheat in brewing and baking / G.V. Shaburov, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2014. No. 4. pp. 79–83.
- [2] Technological aspects of regulating the yield of the extract when obtaining beer wort / P.K. Garkina, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2020. Vol. 8. No. 2. pp. 13–20.

- [3] Extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids and food fibers / A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Technics and technology of food production. 2016. No. 3 (42). pp. 104-111.
- [4] Optimization of the composition of grain products when obtaining beer wort using extruded barley / G.V. Shaburova, A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, D.I. Frolov // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2014. No. 6 (22). pp. 103-109.
- [5] Rational technological parameters in the production of a multicomponent composite based on flax seeds / V.M. Zimnyakov, O. N. Kukharev, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // Niva Volga region. 2017. No. 4 (45). pp. 157-163.
- [6] Increasing the efficiency of extrudate dehydration in the vacuum chamber of the modernized extruder / D.I. Frolov [and others] // Niva of the Volga region. 2019. No. 2 (51). pp. 134-143.
- [7] Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of the modernized extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // News of the Samara State Agricultural Academy. 2015. No. 3. pp. 15–20.
- [8] Potapov M.A., Frolov D.I., Kurochkin A.A. Optimization of the number of holes in the die of a single-screw extruder for processing poultry manure // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2020. T. 5. No. 4. pp. 42–48.
- [9] Regulation of the structure of extrudates of starch-containing grain raw materials / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // News of the Samara State Agricultural Academy. 2013. No. 4. pp. 94–99.
- [10] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Determination of the main parameters of the vacuum chamber of the modernized extruder // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2015. No. 4 (32). pp. 172-177.
- [11] Liu R.H. Whole grain phytochemicals and health. J. Cereal Sci. 46: 207-219 (2007).
- [12] Modeling the process of extrudates production based on a new technological solution / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Niva of the Volga region. 2014. No. 30, pp. 70–76.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Лукьянова Елизавета Александровна магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: E-mail: liza-lukyanova-97@mail.ru</p>	<p>Luk'yanova Elizaveta Aleksandrovna undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: E-mail: liza-lukyanova-97@mail.ru</p>