

Анализ влияния температуры матрицы и влажности сырья на крутящий момент двигателя экструдера

Фролов Д.И., Долгов М.В.

Аннотация. В статье рассмотрено влияние влажности сырья и температуры матрицы экструдера на крутящий момент двигателя и удельную механическую энергию. Для измерения крутящего момента использовали лабораторный экструдер ЭК-40 и комбинацию щелевой матрицы/реометра. Крутящий момент уменьшался с увеличением влажности и температуры матрицы. Установлено, что температура матрицы является наиболее значимым параметром, влияющим на крутящий момент и удельную механическую энергию.

Ключевые слова: экструзия, удельная механическая энергия, крутящий момент, температура, влагосодержание.

Для цитирования: Фролов Д.И., Долгов М.В. Анализ влияния температуры матрицы и влажности сырья на крутящий момент двигателя экструдера // Инновационная техника и технология. 2020. № 4 (25). С. 40–45.

Analysis of the influence of the temperature of the matrix and moisture content of the raw material on the torque of the extruder motor

Frolov D.I., Dolgov M.V.

Abstract. The article discusses the influence of the moisture content of raw materials and the temperature of the extruder die on the engine torque and specific mechanical energy. An EK-40 laboratory extruder and a slot die / rheometer combination were used to measure the torque. The torque decreased with increasing humidity and temperature of the die. It was found that the temperature of the matrix is the most significant parameter affecting the torque and specific mechanical energy.

Keywords: extrusion, specific mechanical energy, torque, temperature, moisture content.

For citation: Frolov D.I., Dolgov M.V. Analysis of the influence of the temperature of the matrix and moisture content of the raw material on the torque of the extruder motor. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.4 (25). pp. 40–45. (In Russ.).

Введение

Пищевые материалы часто неоднородны и содержат различные ингредиенты. Их свойства зависят от источника сырья, предварительной обработки, вида обработки и трудно поддаются физическому и химическому описанию [1]. Во время экструзии молекулы крахмала подвергаются различным биохимическим реакциям, таким как желатинизация и молекулярная деградация вследствие термической и механической обработки [3]. Степень физико-химических изменений может зависеть от типа крахмала, уровня влажности в сырье, наличия других компонентов, характеристик машины, времени пребывания в экструдере и конфигурации шнека [4]. Реологическое поведение системы с

высокой влажностью не должно быть таким же, как у экструзионных систем с низкой или промежуточной влажностью. Распределение сдвига, перемешивания, механического тепла и конвективного тепла может отличаться в системах с высокой влажностью по сравнению с системами с низкой или промежуточной влажностью [5, 6, 7, 8].

Матрица является основным компонентом экструдера. Понимание свойств материала и характера потока в матрице экструдера имеет первостепенное значение для контроля производительности экструдера и качества экструдата. Конфигурация матрицы играет определенную роль в управлении текстурой конечного продукта [10]. Другая функция матрицы состоит в том, чтобы стабилизировать поток, выходящий из цилиндра экструдера, и, следовательно,

сформировать из него желаемый продукт. В последнее время разрабатывается и имеет большие перспективы термовакуумная экструзия [11-13].

Матрицы экструдера могут быть оснащены щелевыми или капиллярными реометрами для непрерывного измерения реологических свойств пищевого расплава в режиме реального времени и предоставления ценной информации для дальнейших реологических расчетов, получения кривых течения. Оценка скорости сдвига, напряжения сдвига и вязкости расплава может быть выполнена путем оперативного определения свойств текучести в экструдере и матрице. После определения перепада давления вдоль матрицы возможна оценка характеристик течения пищевого расплава. Важно следить за вязкостью пищевого расплава, так как она оказывает непосредственное влияние на качество конечного продукта. Моделирование течения в экструдере с использованием реометра дало бы ошибочные результаты. Анализ экструдата, выходящего из матрицы, не будет хорошим представлением расплава в барабане экструдера, поскольку материал претерпевает внезапные изменения, как только он покидает матрицу, такие как набухание и испарение влаги в результате изменения давления.

Крутящий момент двигателя, обеспечивает прямую зависимость от энергии, поглощаемой материалом из-за сдвига, оказываемого шнеком экструдера и отверстием матрицы. Колебания крутящего момента, а следовательно, и энергии, указывают на неустойчивую подачу, всплеск и закупорку. Крутящий момент двигателя является очень чувствительным индикатором во время работы экструдера.

Целью работы являлась исследование влияния температуры матрицы и влажности сырья на крутящий момент двигателя экструдера.

Объекты и методы исследований

Для проведения исследований был использован рисовый крахмал (6% влаги). Крахмал смешивали с водой в лабораторном смесителе для достижения влажности 55%, 60% и 65% (г воды/г раствора). Смешанную суспензию в резервуаре непрерывно перемешивали, чтобы поддерживать равномерную концентрацию. Экструзионные испытания проводились с использованием реометра и одношнекового экструдера ЭК-40. Размеры щели составляли 1,47 мм в высоту и 20 мм в ширину. Исследовались температуры 80, 85, 90, 100°C. Температура продукта вместе с отклонением от заданной температуры измерялась четырьмя термодатчиками вдоль корпуса экструдера.

Экструдер работал при каждом содержании влаги, температуре матрицы, скорости шнека и массовом расходе до тех пор, пока не было достигнуто установившееся состояние (постоянный крутящий момент двигателя). Регистрировались параметры отклика экструдера и крутящий момент двигателя.

Были использованы три различных скорости вращения винта шнека (170, 220 и 270 об / мин). Массовый расход варьировался от 3 до 7 кг/ч.

Результаты и их обсуждение

Регрессионный анализ для крутящего момента двигателя и удельная механическая энергия (УМЭ). Пошаговый регрессионный анализ с элементами взаимодействия и без них показал, что взаимодействия не улучшили модель R2 крутящего момента. Условия взаимодействия внесли вклад в улучшение R2 удельной механической энергии только на 4,5%, поэтому они были исключены из регрессионного анализа. Пошаговый регрессионный анализ показал, что на крутящий момент и удельную механическую энергию наиболее существенно влияет температура матрицы. Вклад температуры матрицы в крутящий момент модели R2 составлял 86,75% и 81,18% для удельной механической энергии. Общие R2 для крутящего момента и удельной механической энергии были 0,83 и 0,85 соответственно. Таблицы 1 и 2 показывают вклад основных переменных в изменение крутящего момента и значений удельной механической энергии R2. Содержание влаги влияло на крутящий момент и удельную механическую энергию в заданном порядке.

Крутящий момент, необходимый для поворота шнека экструдера, зависит от скорости шнека, степени заполнения цилиндра и вязкости пищевого расплава в канале шнека и на головке. Измеренный крутящий момент представляет собой общий крутящий момент, который состоит из двух компонентов: крутящего момента, необходимого для проталкивания сырья и крутящего момента, необходимого для поворота винтов, то есть крутящего момента без нагрузки. При эксплуатации экструдера с водой при рабочих температурах и

Таблица 1 – Регрессионный анализ крутящего момента двигателя

| Переменная | Коэффициент частичной детерминации R^2 | Вклад в коэффициент детерминации (%) |
|---------------------|--|--------------------------------------|
| Температура матрицы | 0,72 | 86,75 |
| Содержание влаги | 0,11 | 13,25 |

Таблица 2 – Регрессионный анализ удельной механической энергии

| Переменная | Коэффициент частичной детерминации R^2 | Вклад в коэффициент детерминации (%) |
|---------------------|--|--------------------------------------|
| Температура матрицы | 0,69 | 81,18 |
| Содержание влаги | 0,16 | 18,82 |

скоростях шнека измеряли крутящий момент без нагрузки. Обычно крутящий момент без нагрузки составлял от 11% до 72% от общего крутящего момента, в зависимости от условий эксплуатации. Чтобы измерить работу экструдера и удельную механическую энергию, необходимо определить крутящий момент системы при проталкивании сырья. Значения крутящего момента двигателя, указанные в этом исследовании, были общим крутящим моментом.

Удельная механическая энергия (УМЭ) может быть определена как энергия, передаваемая

моторным приводом материалу в экструдере на единицу массы [2]:

$$\text{УМЭ} = \frac{M_p \cdot n}{Q_m} \quad (1)$$

где УМЭ - удельная механическая энергия (Дж/кг), M_p - крутящий момент при проталкивании сырья (Н·м), n - скорость вращения шнека (об/мин), а Q_m - массовый расход (кг/ч).

Любая переменная, влияющая на вязкость, соответственно повлияет на крутящий момент и удельную механическую энергию. Повышение

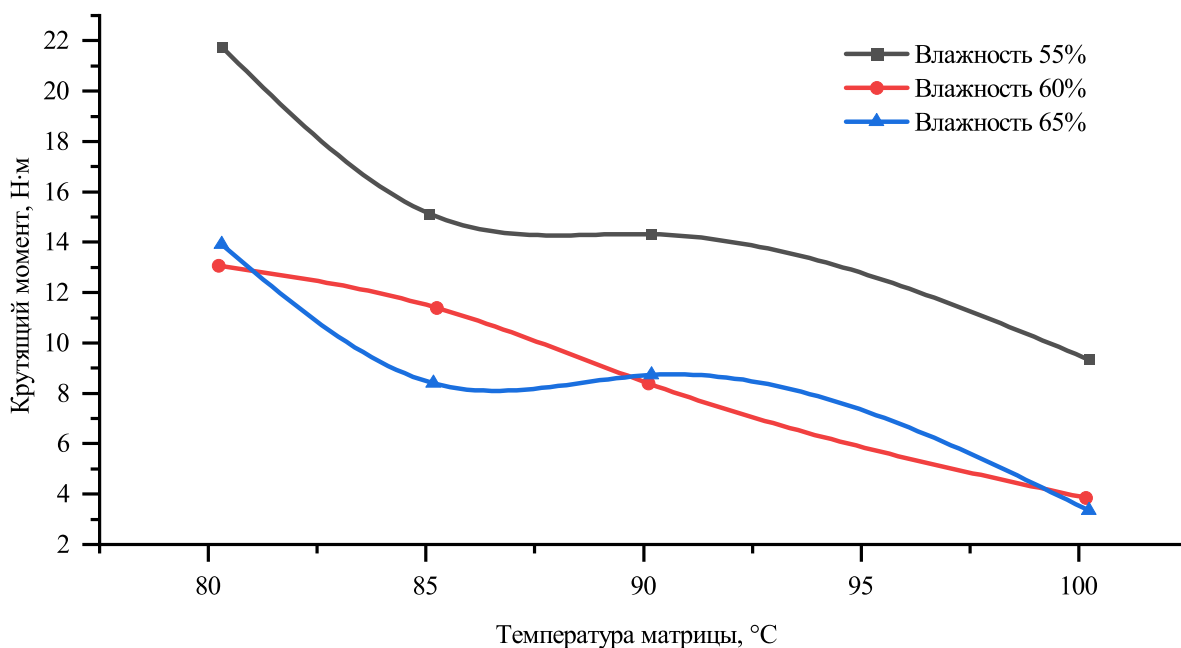


Рис. 1. Влияние температуры матрицы и содержания влаги на крутящий момент двигателя (270 об/мин, скорость шнека; 6 кг/ч, массовый расход)

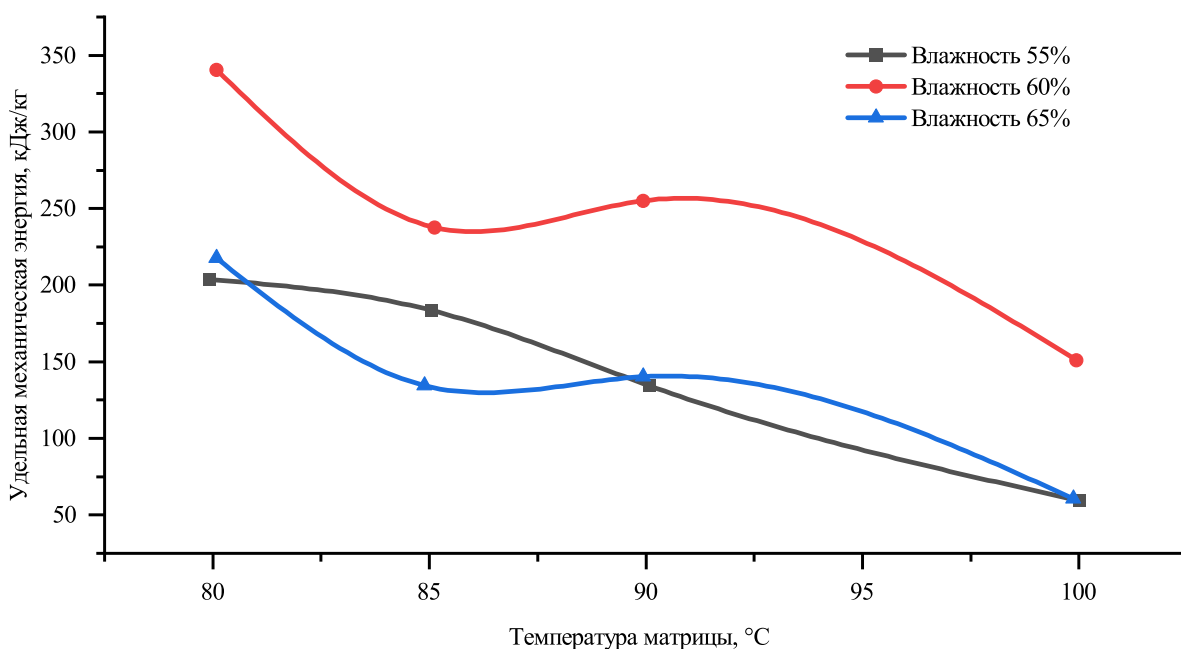


Рис. 2. Влияние температуры матрицы и содержания влаги на удельную механическую энергию (270 об/мин, скорость шнека; 6 кг/ч, массовый расход)

температуры матрицы вызывает снижение вязкости расплава. Следовательно, повышение температуры при постоянном содержании влаги, скорости вращения шнека и массовом расходе привело к уменьшению крутящего момента и удельной механической энергии (рис. 1 и 2).

Крутящий момент двигателя уменьшался по мере увеличения влажности. При более высоком содержании влаги из-за более низкой вязкости расплава крутящий момент уменьшался. При содержании влаги 55%, 60% и 65% общий крутящий момент составил 16, 11 и 10 Н·м соответственно при температуре 90 °С, 270 об / мин и массовом расходе 6 кг/ч. Как видно из рисунка 1, крутящий момент двигателя при 60% и 65% влажности почти перекрывался. Одной из причин этого может быть то, что чувствительность реометра крутящего момента была невысокой при более низком содержании влаги, что соответствует более низкой вязкости. Диапазон регистрации крутящего момента составлял 0-200 Н·м. Другая причина может быть связана с запуском экструдера. Как упоминалось ранее, крутящий момент двигателя варьировался в зависимости от запуска экструдера. Хотя аналогичная процедура запуска выполнялась каждый раз, не было никакого контроля над относительной влажностью и колебаниями температуры на экспериментальной установке, где проводились эксперименты. Следовательно, изменения крутящего момента, а значит, и в удельной механической энергии, в определенной степени были неизбежны.

Увеличение содержания влаги в сырье и, следовательно, снижение вязкости привело к более низкой удельной механической энергии. При температуре матрицы 90 °С, скорости вращения шнека 270 об / мин и массовом расходе 6 кг/ч удельная механическая энергия составляла 261, 140 и 145 кДж/кг (рис. 2). Приведенный выше аргумент о перекрывающихся значениях крутящего момента при содержании влаги 60% и 65% также действителен для удельной механической энергии, поскольку он был рассчитан непосредственно из значений крутящего момента с использованием уравнения 1.

Высокое содержание влаги в сырье (65%) в сочетании с высокой температурой (100 °С) вызывало значительно более медленную скорость изменения крутящего момента, поскольку массовый расход изменялся от 3 до 7 кг/ч. Это можно объяснить более медленными изменениями вязкости расплава в этих рабочих условиях из-за термомеханических эффектов и эффектов разбавления. Изменение крутящего момента и удельной механической энергии более значимо при более высокой вязкости расплава, что соответствует относительно низким температурам (80 и 90 °С) и содержанию влаги (55 и 60%) в экспериментальном диапазоне. Кроме того, чувствительность реометра при измерении крутящего момента может быть

ниже из-за низкой вязкости при влажности 65% и температуре 100 °С.

В этом исследовании повышение температуры привело к снижению вязкости расплава в канале шнека и снижению крутящего момента и удельной механической энергии. Этот результат согласуется с выводами других исследователей, например при исследовании экструзии кукурузной муки при более низком содержании влаги (от 14% до 26%). Также подобные результаты были получены при экструзии пшеничной муки с низким содержанием влаги (сообщалось о снижении удельной механической энергии при повышении температуры с увеличением температуры ствола шнека с 80 до 190 °С). Повышение температуры при более низких соотношениях длины шнека к диаметру (например, 16) во время экструзии рисовой муки при 25%-ном конечном содержании влаги в смеси вызвало увеличение удельной механической энергии и почти не зарегистрировано никаких изменений при более высоких отношениях длины шнека к диаметру (более 20).

Более низкая удельная механическая энергия обычно приводит к более низкому молекулярному распаду крахмала. В данном исследовании произошла полная клейстеризация крахмала. При избытке воды 14 молекул воды реагируют с одной глюкозной единицей крахмала с образованием желатинизированного крахмала. Возможно, что более высокое содержание влаги в сырье, а также сдвиг, перемешивание и повышенные температуры вызвали полную клейстеризацию крахмала. Термомеханическое воздействие также может способствовать потере кристаллической структуры молекул крахмала во время экструзии.

Выводы

В проведенном исследовании было показано, что на крутящий момент двигателя и удельную механическую энергию существенно влияют условия работы экструдера. Регрессионный анализ показал, что температура матрицы составляет более половины вклада в модель R2 крутящего момента и удельной механической энергии. Содержание влаги в сырье влияло на крутящий момент и характеристики удельной механической энергии. Крутящий момент двигателя уменьшался с увеличением влажности и температуры. Повышение влажности и температуры матрицы также привело к снижению удельной механической энергии. Скорость изменения крутящего момента и удельной механической энергии была значительно ниже при содержании влаги 65% и температуре матрицы 100 °С из-за более низкой скорости изменения вязкости расплава. Изучение взаимосвязи между вязкостью и удельной механической энергии может привести к лучшему пониманию экструзии с высоким содержанием влаги.

Список литературы

- [1] Liang, Y., Hosahalli, S. R. & Joyce, B. (2012). Twin-screw extrusion of corn flour and sotprotein isolate (SPI) blends: a response surface analysis. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 485-497.
- [2] Roland, W., Marschik, C., Krieger, M., Low-Baselli, B. & Miethlinger, J. (2019). Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 268, 12-19.
- [3] Maung, T.-T., Gu, B.-Y., & Ryu, G.-H. (2020). Influence of extrusion process parameters on specific mechanical energy and physical properties of high-moisture meat analog. *International Journal of Food Engineering*, 0, 20200042. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0042>
- [4] Robin, F., Bovet, N., Pineau, N., Schuchmann, H. P., & Palzer, S. (2011). Online shear viscosity measurement of starchy melts enriched in wheat bran. *Journal of Food Science*, 76(5), E405-412. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02193.x>
- [5] 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.
- [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] Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // *Volga Region Farmland*. 2019. № 2 (2). P. 87–94.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Технологические аспекты регулирования выхода экстракта при получении пивного суслу / 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.
- [13] 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.

References

- [1] Liang, Y., Hosahalli, S. R. & Joyce, B. (2012). Twin-screw extrusion of corn flour and sotprotein isolate (SPI) blends: a response surface analysis. *Food and Bioprocess Technology*, 5 (2), 485-497.
- [2] Roland, W., Marschik, C., Krieger, M., Low-Baselli, B. & Miethlinger, J. (2019). Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 268, 12-19.
- [3] Maung, T.-T., Gu, B.-Y., & Ryu, G.-H. (2020). Influence of extrusion process parameters on specific mechanical energy and physical properties of high-moisture meat analog. *International Journal of Food Engineering*, 0, 20200042. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0042>
- [4] Robin, F., Bovet, N., Pineau, N., Schuchmann, H. P., & Palzer, S. (2011). Online shear viscosity measurement of starchy melts enriched in wheat bran. *Journal of Food Science*, 76 (5), E405-412. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02193.x>
- [5] 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. Т. 5. No. 4. pp. 42–48.
- [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] Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // Volga Region Farmland. 2019. No. 2 (2). pp. 87–94.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

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>Долгов Максим Викторович студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p> | <p>Dolgov Maxim Viktorovich student of the department «Food productions» Penza State Technological University</p> |