

Классификация энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья

Курочкин А.А., Аширов Р.Р., Поляков А.В.

Аннотация. Актуальность разработки энергоэффективного оборудования для экструзии растительного сырья обусловлена чрезвычайной энергоемкостью классической технологии, при которой преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется на не выгодных с точки зрения термодинамики условиях. В работе предложена классификация энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья. Ее детальный анализ позволит обосновать наиболее перспективное направление в модернизации энергоэффективного оборудования, позволяющего реализовать технологический процесс варочной термовакуумной экструзии сырья при высоком содержании в нем влаги, умеренных температурах и относительно мягких условиях механических напряжений. Такие рабочие параметры экструзионного процесса весьма выгодны с позиции сохранения термолабильных ингредиентов перерабатываемого сырья.

Ключевые слова: классификация, энергоэффективная система, технология, шнек, термовакуумная экструзия.

Для цитирования: Курочкин А.А., Аширов Р.Р., Поляков А.В. Классификация энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 3. С. 45–49.

Classification of energy-efficient systems for thermoplastic extrusion of plant raw materials

Kurochkin A.A., Ashirov R.R., Polyakov A.V.

Abstract. The relevance of developing energy-efficient equipment for the extrusion of plant raw materials is due to the extremely energy-intensive nature of the classical technology, in which the conversion of electrical energy into thermal energy is carried out under conditions that are not advantageous from a thermodynamic perspective. This paper proposes a classification of energy-efficient systems for thermoplastic extrusion of plant raw materials. A detailed analysis of this classification will help to identify the most promising direction for the modernization of energy-efficient equipment that allows for the implementation of the process of cooking thermovacuum extrusion of raw materials with a high moisture content, moderate temperatures, and relatively mild mechanical stress conditions. Such operating parameters of the extrusion process are highly advantageous in terms of preserving the thermolabile ingredients of the processed raw material.

Keywords: classification, energy-efficient system, technology, auger, thermovacuum extrusion.

For citation: Kurochkin A.A., Ashirov R.R., Polyakov A.V. Classification of energy-efficient systems for thermoplastic extrusion of plant raw materials. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 3. pp. 45–49. (In Russ.).

Введение

Экструзионная обработка сельскохозяйственного сырья с целью получения продуктов питания практикуется уже давно и относится к наиболее наукоемким пищевым технологиям.

В общем виде технология предполагает при-

менение машины с рабочим органом, представляющим собой трубчатый цилиндр, оснащенный загрузочным устройством на одном конце и фильерой с ограниченным по размерам отверстием на выходе, а также вращающимся внутри цилиндра шнеком со спиральной нарезкой.

Обычно классификация экструдеров строится

на основе всех признаков, присущих этой группе оборудования, независимо от вида обрабатываемого сырья и вырабатываемой продукции. Для обработки пищевого сырья более актуальны классификационные признаки, характеризующие конструктивное исполнение, термодинамическую характеристику, а также тип рабочего органа и его основные параметры – частота вращения, соотношение диаметра и длины, профиль шнека и фильеры [1, 2].

Фокусируясь на оборудовании, предназначенном для обработки сельскохозяйственного сырья, можно отметить, что в этом сегменте экструзионных технологий наиболее широкое применение получили экструдеры с одним или двумя шнеками, а рабочий процесс этих машин осуществляется по автогенному, политропному или изотермическому принципу термодинамики.

В автогенных экструдерах тепло, необходимое для термической обработки сырья, генерируется непосредственно в камере экструдера за счет диссипации механической энергии. С этой целью специальные конструкции узлов рабочих органов экструдера (шнеки, камера, фильеры) создают сопротивление движению перемещаемого материала, что способствует его нагреву температуры до 120-200°C. Данный принцип разогрева обрабатываемого сырья используется, как правило, в одношнековых экструдерах [1, 5].

В политропных экструдерах процесс термической обработки материала осуществляется как за счет внутреннего разогрева обрабатываемой массы, так и с помощью внешних источников тепла. Большинство экструдеров для варочной экструзии относится именно к такому типу и внутренний разогрев у них осуществляется за счет конструкции рабочего органа. Для внешнего нагрева шнека (шнеков) политропного экструдера может применяться электрический, жидкостной или паровой способ.

Типаж изотермических экструдеров ограничивается спецификой их применения: они предназначены для формования макаронных изделий и хлебного теста. В таких машинах тепло контролируется за счет охлаждения внешним теплообменником [1, 2].

Горячая экструзия сельскохозяйственного сырья является весьма энергозатратной технологической операцией, высокое качество которой обеспечивается за счет применения дорогостоящего оборудования. При этом в отдельных случаях целесообразно применять более дешевые экструдеры с коротким шнеком и автогенным принципом действия, рабочий цикл которых (в упрощенном виде) представляет собой перемещение обрабатываемого сырья в рабочем тракте машины от места загрузки до фильеры матрицы с одновременным его нагревом до необходимой температуры [1].

С позиции системного подхода этот рабочий цикл представляет собой многократную трансформацию одного вида энергии в другой. Например, первый этап цикла представляет собой трансфор-

мацию энергии электродвигателя привода экструдера в механическую энергию его шнека. На втором этапе часть механической энергии вращающегося шнека расходуется на измельчение и перемещение сырья по внутреннему тракту экструдера, а оставшаяся – преобразуется в тепловую за счёт вязкого трения, сжатия и диссипации энергии в вязкоупругой массе обрабатываемого материала.

При выходе из фильеры, когда экструдат попадает из зоны высокого давления в зону атмосферного, тепловая энергия делится на два потока: первый из них способствует изменению макро- и микроструктуры получаемого продукта, а второй в виде горячего водяного пара выбрасывается в атмосферу. Таким образом, тепловая энергия водяного пара в последующих технологических операциях по производству экструдатов полезно не используется и ее регенерация в существующих экструдерах практически не применяется [1, 3, 4].

Следует отметить, что многолетняя эволюция экструзионной технологий базируется не только на постулатах, связанных с обработкой сельскохозяйственного сырья в агропромышленном комплексе страны, но и органично впитала в себя векторы развития других отраслей производства. При этом очевидно, что в некоторых из них с учётом физико-химических свойств обрабатываемых материалов и особенностей самих методов экструзионной обработки накоплен опыт применения технологических приемов и модернизированного оборудования для сформулированной проблемной ситуации.

Целью работы является разработка классификации энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья, которая отражает актуальное направление в данной технологии.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлась научно-техническая и патентная информация относительно устройства, принципа действия и конструктивных особенностей энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья. В работе применялся аналитический метод исследований, основанный на системном подходе к рассматриваемой проблеме.

Результаты и их обсуждение

Анализ предлагаемой в работе классификации энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья (рис. 1) целесообразно выполнить в соответствии со структурно-технологической схемой экструдеров, как в штатной комплектации, так и экспериментальных образцов, представленных в информационной среде России и зарубежных источников.

Система транспортирования экструдера выполняет роль насоса, который должен перемещать

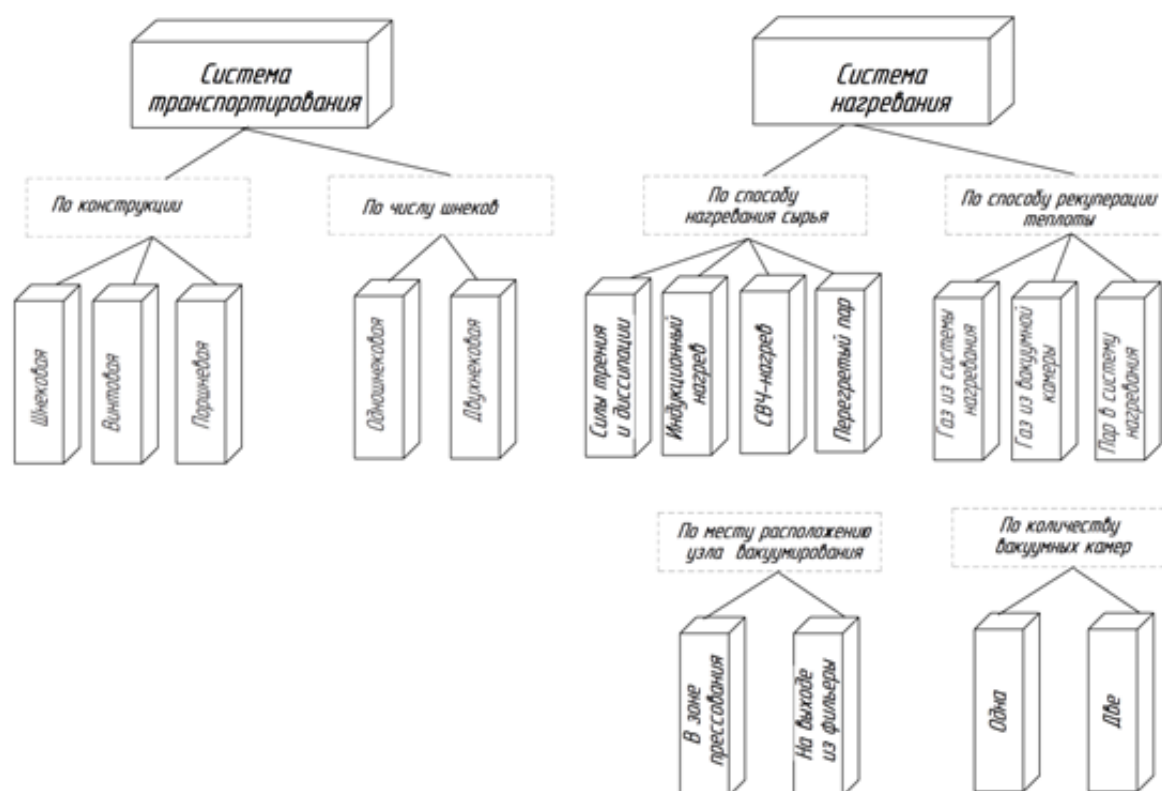


Рис. 1. Классификация энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья

обрабатываемого сырья внутри технологического тракта экструдера под определенным напором с помощью рабочего органа шнекового, винтового или поршневого типа. При этом лишь шнековый рабочий орган в полной мере отвечает всем задачам экструзионного процесса: наряду с перемещением сырья, он преобразует механическую энергию своего вращения в тепловую и, по существу, позволяет реализовать интегрированный процесс в составе технологических операций экструдера – нагрев, смешивание, денатурация, гелеобразование, стерилизация и формование. Отметим, что нагрев при таком способе воздействия осуществляется объёмно и непосредственно в обрабатываемом сырье. Подобными преимуществами не обладает ни одна из систем транспортирования, приведенных в классификации. Что касается давления на выходе транспортирующей системы, то по этому показателю при одинаковой технической сложности наиболее предпочтительна система поршневого типа.

Система нагревания для реализации термопластической экструзии в случае применения в экструдере рабочего органа шнекового типа естественным образом сопряжена с его системой транспортирования и в некоторых случаях может быть основана на индукционном или СВЧ-нагреве обрабатываемого сырья.

Сравнение энергоэффективности нагрева за счёт трения частиц при экструдировании и СВЧ-нагрева для растительного сырья (например, зерна, муки, биомассы и т.п.) требует учёта физико-химических свойств таких материалов и особенностей самих методов.

СВЧ-нагрев растительного сырья основан на воздействии микроволн, проникающих в материал, и возбуждающих полярные молекулы (в первую очередь – воду). В системе нагрева экструдера такой способ эффективен только если обрабатываемое сырье содержит влагу или полярные компоненты. При влажности сырья $>25\%$ КПД СВЧ-нагрева может достигать 85-90%, что позволяет рекомендовать его взамен нагрева трением.

Более перспективным способом снижения затрат энергии на экструдирование предполагает впрыск перегретого пара в зону экструдирования.

Целый ряд научных работ и патентов в зарубежной практике модернизации экструзионного оборудования предлагает использовать тепловую энергию (ТЭ), получаемую при инъекции пара/воды с целью замещения высокотратной механической энергии (МЭ), используемой в традиционном экструзионном процессе. С этой целью шнек в цилиндре экструдера спроектирован таким образом, чтобы попеременно транспортировать и обрабатывать сырье, обеспечивая при этом инъекцию значительного количества пара в цилиндр. Такое конструктивное решение шнека, обеспечивает в экструдере чередование зон инъекции пара с зонами высокого трения и сдвига, что способствует более полной гидратации обрабатываемого сырья. При таком режиме рабочего процесса экструдера затрачивается значительно меньше электрической энергии и существенно снижается интенсивность износа шнека и цилиндра [7-9].

В варочном экструдере с улучшенными характеристиками количество впрыскиваемого пара

составляет примерно 7-25% по весу в расчете на общую сухую массу исходного материала, принимаемому за 100%. Вследствие такого высокого уровня впрыскиваемого пара потребление электрической энергии существенно уменьшается и составляет от 5 до 22 кВт·ч/т, что ниже характеристики экструдеров в штатной комплектации примерно в 3 раза [7].

Российскими учеными исследован способ рекуперации теплоты в процессе экструзии, включающий отбор части пара, генерируемого реверсивными элементами шнеков экструдера «Werner&Phleiderer Continua 37» и его подачу под давлением 0,2-0,3 МПа в начальную зону экструзионной камеры для предварительной термической обработки поступающего туда сырья. В условиях экспериментальной установки авторам эксперимента удалось снизить энергозатраты на проведение процесса экструзии на 14-17% [5].

Известен способ модернизации экструдера, в котором к выходной матрице присоединена камера с вакуумной системой. В машине, с помощью которой реализуется вакуумное воздействие на выходящее из фильеры матрицы сырье, поставлена задача интенсификации экструзионного процесса путем частичной замены в нем термической составляющей на механическую [4].

В таком экструдере резкое снижение давления при выходе экструдата из фильеры (зона повышенного давления) в вакуумную камеру (зона пониженного давления), приводит к возникновению дополнительной движущей силы – нерелаксируемому градиенту общего давления, в результате чего происходит бурное парообразование по всему объему экструдата, и формирующийся молярный поток выносит из продукта вместе с паром и часть влаги

в жидкой фазе. Таким образом, механизм обезвоживания в этом случае оказывается аналогичным механическому удалению влаги посредством прессования или центрифугирования.

При этом регулируя величину барометрического давления, а значит и процесс парообразования, можно добиться как изменения влажности капиллярно-пористого экструдата, так и частичной или полной его реструктуризации. Зная границы структурных изменений экструдата, параметры вакуумного воздействия на него рекомендуется выбирать именно из таких соображений [1].

Альтернативным способом влияния на режимы экструдирования при переработке влажного сырья может быть отбор пара непосредственно из камеры экструдера до выхода жгута через отверстия фильеры, что не требует подключения системы вакуумирования [6].

Выводы

В работе предложена классификация энергоэффективных систем для термопластической экструзии растительного сырья. Ее детальный анализ позволит обосновать наиболее перспективное направление в модернизации энергоэффективного оборудования, позволяющего реализовать технологический процесс варочной термовакuumной экструзии сырья при высоком содержании в нем влаги, умеренных температурах и относительно мягких условиях механических напряжений. Такие рабочие параметры экструзионного процесса весьма выгодны с позиции сохранения термолабильных ингредиентов перерабатываемого сырья.

Литература

- [1] Инновации в экструзии /А.А. Курочкин, П.К. Гарькина, А.А. Блинохватов [и др.]. Пенза: РИО ПГАУ, 2018. – 247 с.
- [2] Курочкин, А.А. Классификация энергосберегающих агрегатов для термовакuumной экструзии сельскохозяйственного сырья /А.А. Курочкин, Р.Р. Аширов, А.В. Поляков //Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12, № 1. С. 72-77.
- [3] Пат. 2460315 Российская Федерация МПК A23L1/00. Способ производства экструдатов /Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, П.К. Воронина [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия». – №20011107960; заявл. 01.03.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. №25. 6 с.
- [4] Пат. 2783914 Российская Федерация МПК A23P 10/25. Агрегат для термовакuumной

References

- [1] Kurochkin, A. A., Garkina, P. K., Blinokhvatov, A. A., et al. (2018). Innovatsii v ekstruzii [Innovations in extrusion] (247 p.). Penza State Agrarian University Publishing House (RIO PGU).
- [2] Kurochkin, A. A., Ashirov, R. R., & Polyakov, A. V. (2025). Klassifikatsiya energosberegayushchikh agregatov dlya termovakuumnoy ekstruzii sel'skokhozyaystvennogo syr'ya [Classification of energy-saving units for thermovacuum extrusion of agricultural raw materials]. Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya [Innovative Equipment and Technology], 12(1), 72–77.
- [3] Shaburova, G. V., Kurochkin, A. A., Voronina, P. K., et al. (2011). Sposob proizvodstva ekstrudatov [Method for producing extrudates] (Patent No. RU 2460315). Federal Service for Intellectual Property. (Application No. 2011107960, filed March 1, 2011; published September 10, 2011, Bulletin No. 25).
- [4] Kurochkin, A. A., Frolov, D. I., Garkina, P. K., et al. (2022). Agregat dlya termovakuumnoy ekstruzii

- экструзии растительного сырья /заявители: А.А. Курочкин, Д.И. Фролов, П.К. Гарькина [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Пензенский ГАУ. № 2021110152; заявл. 13.04.2021; опубл. 13.10.2022, Бюл. № 29. 9с.
- [5] Степанов, В. И. Экструдирование зернового сырья с использованием процесса рекуперации пара / В.И. Степанов, В.В. Иванов, А.Ю. Шариков [и др.]. // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 3 (81). С. 17-22.
- [6] Шариков, А.Ю. Экструдирование смесей пшеницы и выжимок моркови повышенной влажности в технологии продуктов, готовых к употреблению /А.Ю. Шариков, В.И. Степанов, В.В. Иванов [и др.]. // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 43-49.
- [7] Pat. № 07521076, US, A23P 1/10. Method and apparatus for producing fully cooked extrudates with significantly reduced specific mechanical energy inputs / Wenger LaVon, Wenger Marc, Rokey Galen J., Spellmeier Allan C. № 12/263,825; Appl. 03.11.2008; Publ. 21.04.2009.
- [8] Riaz M. N. Introduction to extruders and their principles //Extruders in food applications. – CrC Press, 2000. – С. 1-23.
- [9] Sørensen M. et al. Starch source, screw configuration and injection of steam into the barrel affect the physical quality of extruded fish feed //Aquaculture Research. – 2010. – Т. 41. – №. 3. – С. 419-432.
- rastitel'nogo syr'ya [Unit for thermovacuum extrusion of plant raw materials] (Patent No. RU 2783914). Federal Service for Intellectual Property. (Application No. 2021110152, filed April 13, 2021; published October 13, 2022, Bulletin No. 29).
- [5] Stepanov, V. I., Ivanov, V. V., Sharikov, A. Yu., et al. (2019). Ekstrudirovanie zernovogo syr'ya s ispol'zovaniem protsessa rekuperatsii para [Extrusion of cereal raw materials using steam recovery process]. Vestnik VGUIT [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies], 81(3(81)), 17–22.
- [6] Sharikov, A. Yu., Stepanov, V. I., Ivanov, V. V., et al. (2018). Ekstrudirovanie smesey pshenitsy i vyzhimok morkovi povyshennoy vlazhnosti v tekhnologii produktov, gotovykh k upotrebleniyu [Extrusion of wheat and high-moisture carrot pomace blends in ready-to-eat food technology]. Vestnik VGUIT [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies], 80(3), 43–49.
- [7] Wenger, L., Wenger, M., Rokey, G. J., & Spellmeier, A. C. (2009). Method and apparatus for producing fully cooked extrudates with significantly reduced specific mechanical energy inputs (Patent No. US 7521076 B2). United States Patent and Trademark Office. (Application No. 12/263,825, filed November 3, 2008; published April 21, 2009).
- [8] Riaz, M. N. (2000). Introduction to extruders and their principles. In Extruders in food applications (pp. 1–23). CRC Press.
- [9] Sørensen, M., Torstensen, B. E., Storebakken, T., & Øverland, M. (2010). Starch source, screw configuration and injection of steam into the barrel affect the physical quality of extruded fish feed. Aquaculture Research, 41(3), 419–432. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02358.x>

Сведения об авторах

Information about the authors

Курочкин Анатолий Алексеевич доктор технических наук профессор кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(927) 382-85-03 E-mail: anatolii_kuro@mail.ru	Kurochkin Anatoly Alekseevich D.Sc. in Technical Sciences professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(927) 382-85-03 E-mail: anatolii_kuro@mail.ru
Аширов Равиль Ринатович аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11	Ashirov Ravil Rinatovich upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University
Поляков Александр Викторович аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11	Polyakov Alexander Viktorovich upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University