

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MECHANIZATION OF AGRICULTURE

УДК 664.769

Структурная модель агрегата для термовакuumной обработки растительного сырья

Куручкин А.А., Аширов Р.Р., Поляков А.В.

Аннотация. В статье представлен материал о рациональном подходе к выбору оборудования для экструзионной обработки растительного пищевого сырья с повышенной влажностью. На основе современных представлений о недостатках и возможных путях совершенствования одношнековых экструдеров предложена структурно-технологическая схема агрегата для энергоэффективной термовакuumной обработки сырья растительного происхождения. В конструкции этого агрегата реализованы технические решения, позволяющие обрабатывать растительное сырье с повышенной влажностью методом двухступенчатого воздействия на экструдат в двух последовательно установленных вакуумных камерах с понижением давления по ходу перемещения обрабатываемый материал. Анализ предложенной в работе структурной модели агрегата позволил обосновать подход, обеспечивающий повышение энергоэффективности и упрощение технологических регулировок машины, связанных с возможностью существенного снижения влажности обрабатываемого сырья и готового продукта. Приведенные в работе теоретические зависимости позволяют определить объем водяного пара в камерах предварительного и заключительного термовакuumного воздействия агрегата и с учетом предложенных ограничений в его структурной модели, обосновать основные рабочие параметры термовакuumной системы объекта исследования.

Ключевые слова: агрегат, растительное сырье, экструдер, камера предварительного термовакuumного воздействия, камера заключительного термовакuumного воздействия, объемный расход, экструдат.

Для цитирования: Куручкин А.А., Аширов Р.Р., Поляков А.В. Структурная модель агрегата для термовакuumной обработки растительного сырья // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 4. С. 59–63.

Structural model of a unit for thermovacuum processing of plant raw materials

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

Abstract. The article presents a rational approach to the selection of equipment for extrusion processing of high-moisture vegetable food raw materials. Based on modern ideas about the disadvantages and possible ways of improving single-screw extruders, a structural and technological scheme of an energy-efficient thermovacuum processing unit for vegetable raw materials has been proposed. This unit incorporates technical solutions that allow for the processing of high-moisture vegetable raw materials using a two-stage process involving two sequentially installed vacuum chambers with decreasing pressure as the processed material moves forward. The analysis of the structural model of the unit proposed in the work allowed us to justify an approach that ensures increased energy efficiency and simplifies the technological adjustments of the machine, which are associated with the possibility of significantly reducing the moisture content of the processed raw materials and the finished product.

Keywords: unit, vegetable raw material, extruder, pre-vacuum chamber, final vacuum chamber, volumetric flow rate, extrudate.

For citation: Kurochkin A.A., Ashirov R.R., Polyakov A.V. Structural model of a unit for thermovacuum processing of plant raw materials. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 4. pp. 59–63. (In Russ.).

Введение

Современный уровень развития термопластической экструзии обеспечивает рациональное воздействие на практически все значимые для питания человека макро- и микронутриенты пищевого сырья.

С этих позиций очевидно, что критические потери полезных свойств большинства ингредиентов сырья наблюдаются при его «сухой» экструзии и нагреве до температуры свыше 120–140 °С. Такие параметры характерны для рабочего процесса относительно недорогих по стоимости и эксплуатации одношнековых автогенных экструдеров [1–3, 5].

Одним из перспективных направлений модернизации экструдеров этой группы является оснащение их термовакуумной системой, которая позволяет осуществлять обработку сырья при высоком содержании влаги, умеренных температурах и относительно мягких условиях механических напряжений (сдвига) его ингредиентов. К слову такой режим обработки сырья влажностью до 25% можно обеспечить применением двухшнековых экструдеров, однако готовый продукт в этом случае следует досушивать на специальном оборудовании с дополнительными затратами энергии, что в конечном итоге делает эту технологию экономически нестоятельной.

Результаты ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили эту проблемную ситуацию решить с помощью агрегата для термовакуумной обработки растительного сырья, обеспечивающего повышение энергоэффективности и упрощение его технологических регулировок – влажности обрабатываемого сырья и готового продукта [4].

Цель исследования – обоснование пути совершенствования экструдера с вакуумной камерой на основе структурно-функционального подхода к модели его рабочего процесса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является модернизированный экструдер с вакуумной камерой. В работе применялся метод структурного моделирования, основанный на структурно-функциональном подходе к объекту исследований.

Результаты и их обсуждение

Агрегат для термовакуумной обработки растительного сырья включает в свой состав одношнековый экструдер в штатной комплектации и термовакуумную систему, позволяющую перевести стандартную термопластическую экструзию на новый технологический уровень.

Рабочий процесс экструдера включает операции, которые выполняются серийной машиной аналогичного назначения: перерабатываемое сырьё из загрузочных бункеров 26 и 27 (рис. 1) посредством дозаторов 25 поступает в рабочую зону экструдера и, захваченное шнеком 3, последовательно перемещается по внутреннему тракту машины. Здесь оно измельчается, нагревается, уплотняется и, при соответствующих температуре и давлении выводится через фильеру 4 в зону выгрузки готового продукта. С этого момента полученный экструдат попадает в технологическую зону, где подвергается существенным изменениям под действием низкого давления.

Эти изменения осуществляются под действием термовакуумной системы агрегата, состоящей из камеры предварительного термовакуумного воздействия 5, камеры заключительного термовакуумного воздействия 16, двух шлюзовых затворов 15 и 18, вакуум-баллона 13, вакуум-регулятора 12, вакуум-метра 11, вакуумного насоса 10, газового эжектора 8, вентилятора 20 и трубчатого электронагревателя (ТЭНа) 21.

Камера предварительного термовакуумного воздействия 5 расположена соосно корпусу 2 экструдера и соединена трубопроводом 6 с патрубком пассивного потока газового эжектора 8. Для выпуска воздуха в камеру предусмотрен воздушный кран 19.

Камера заключительного термовакуумного воздействия 16 расположена последовательно камере 5 и ограничена с обеих сторон шлюзовыми затворами 18 и 15. С помощью трубопровода 14 камера соединена с вакуум-баллоном 13, а выпуск воздуха в нее осуществляется посредством крана 17.

Детальный анализ рабочего процесса агрегата можно представить с помощью его структурной модели (рис. 2).

Очевидно, что основными оценочными критериями работы агрегата являются обобщённые значения результирующих факторов каждого из его элементов – $У_1, У_2, У_3, У_4, У_5, У_6, У_7$.

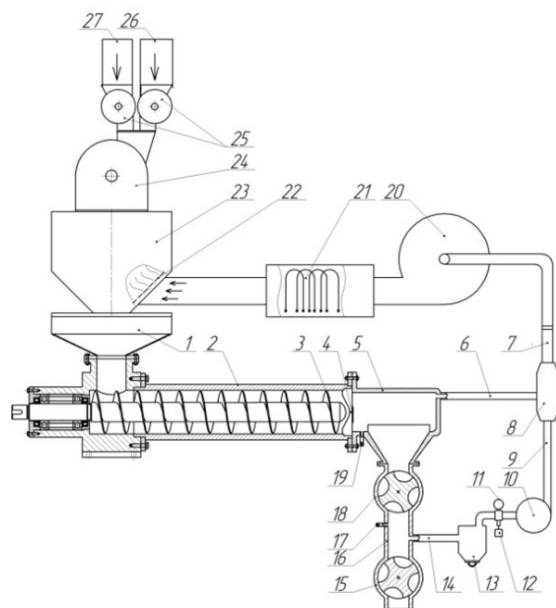


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема агрегата для термовакуумной обработки растительного сырья:

1 – загрузочная камера; 2 – корпус экструдера; 3 – шнек; 4 – фильера; 5 – камера предварительного термовакуумного воздействия; 6, 7, 9, 14 – трубопроводы; 8 – газовый эжектор; 10 – вакуумный насос; 11 – вакуум-метр; 12 – вакуум-регулятор; 13 – вакуум-баллон; 15, 18 – шлюзовые затворы; 16 – камера заключительного термовакуумного воздействия; 17, 19 – воздушные краны; 20 – вентилятор; 21 – ТЭНы; 22 – перфорированная стенка; 23 – бункерный смеситель; 24 – измельчитель; 25 – дозаторы; 26, 27 – загрузочные бункеры

При этом основными внешними воздействиями (входными факторами), оказывающими влияние на работу агрегата, являются обобщенные статистические показатели, характеризующие свойства сырья и готового продукта (f_1, f_2, f_3, f_4).

На значения оценочных критериев оказывают влияние факторы, обусловленные внутренней структурой и параметрами агрегата – $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$.

Конечной целью системного анализа обычно является определение оптимальных, либо рациональных значений факторов $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ с целью доведения показателя f_4 до оптимального (рационального) значения.

В модели не введен элемент, отражающий работу ТЭНа так как агрегат может функционировать и при его отсутствии. Его влияние на показатель f_4 достаточно опосредственно, но при этом не оказывает на полноту анализа модели

Запишем основные ограничения, связанные с практической реализацией предложенной структурной модели агрегата.

Очевидно, что первое из них связано с производительностью каждого элемента, входящего в анализируемую модель:

$$Q_{A_{K2}} \geq Q_{A_{K1}} \geq Q_{ЭК}, \quad (1)$$

где $Q_{A_{K2}}$ – объемный расход экструдата на выходе из камеры заключительного термовакуумного воздействия, $м^3/ч$;

$Q_{A_{K1}}$ – объемный расход экструдата на выходе из камеры предварительного термовакуумного воздействия, $м^3/ч$;

$Q_{ЭК}$ – объемный расход экструдата на выходе из фильеры экструдера после «взрыва», $м^3/ч$.

Обобщенные статистические показатели, характеризующие свойства сырья и готового продукта должны в первую очередь обеспечивать снижение влагосодержания в сырье (готовом продукте) по мере обработки его в каждом элементе модели.

Достаточно удобно и корректно считать, что по мере удаления влаги из сырья или готового продукта их масса будет уменьшаться. Тогда это условие можно формализовать неравенством:

$$M_{ЭК} \geq M_{A_{K1}} \geq M_{A_{K2}}, \quad (2)$$

где $M_{ЭК}$ – масса экструдата на выходе из фильеры экструдера после «взрыва», кг.

$M_{A_{K1}}$ – масса экструдата на выходе из камеры предварительного термовакуумного воздействия, кг;

$M_{A_{K2}}$ – масса экструдата на выходе из камеры заключительного термовакуумного воздействия, кг;

К основным оценочным критериям, оказывающим влияние на факторы, обусловленные внутренней структурой и параметрами экструдера и вакуумных камер, относятся температура и давление. При этом для различных элементов модели эти параметры могут быть жестко связаны между собой – на выходе из экструдера; или относительно независимы – в вакуумных камерах предварительного и окончательного термовакуумного воздействия. Следует особо отметить, что температура экструдата и давление в вакуумных камерах экструдера зависят от конкретных условий протекания рабочего процесса агрегата. К числу таких условий относится зависимость температуры кипения жидкости, находящейся в экструдате, от давления в вакуумных камерах машины.

Исходя из этого постулата для анализируемой модели вытекают следующее ограничение:

$$P_{A_{K2}} \geq P_{A_{K1}}, \quad (3)$$

где $P_{A_{K2}}$ – давление воздуха камере заключительного термовакуумного воздействия, Па;

$P_{A_{K1}}$ – давление воздуха камере предварительного термовакуумного воздействия, Па.

В связи с тем, что при атмосферном давлении вода кипит при температуре примерно $100^{\circ}C$, работоспособность первой вакуумной камеры экструдера обеспечивается достаточно невысокой степенью разрежения в ее объеме. Понижение давления воз-

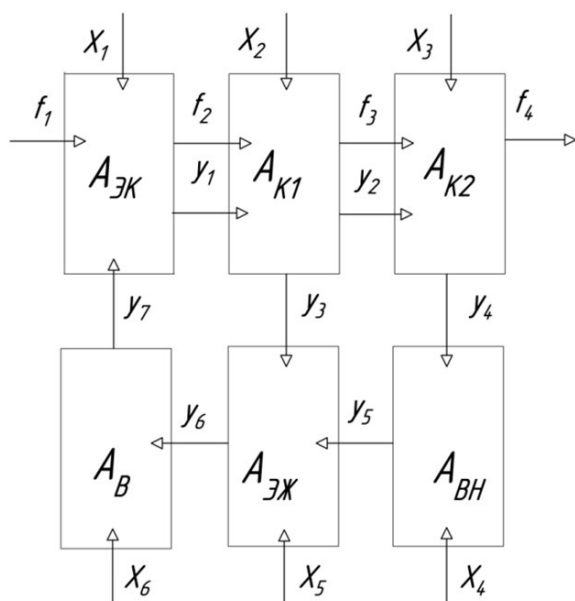


Рис. 2. Структурная модель агрегата для термовакуумной обработки растительного сырья:

$A_{ЭК}$ – экструдер; A_{K1} – камера предварительного термовакуумного воздействия; A_{K2} – камера заключительного термовакуумного воздействия; $A_{ЭЖ}$ – газовый эжектор; $A_{ВН}$ – вакуумный насос; $A_{В}$ – вентилятор.

духа (повышение вакуума) в этом случае диктуется необходимостью более интенсивным «снятием» влагосодержания экструдата за один цикл обработки сырья. Экспериментальными методами установлено, что при обработке экструдатов в камерах с пониженным давлением воздуха можно снизить содержание воды примерно в 2 раза по сравнению с первоначальным значением. При этом температура обрабатываемого сырья снижается на 15-20°C.

Поэтому для интенсивного кипения жидкости в экструдате при его нахождении во второй камере необходимо достаточно высокий вакуум (низкое абсолютное давление) – 500000-600000 Па.

Принцип работы вакуумных камер агрегата основан на постоянном удалении водяных паров, выделяющихся из экструдата при соответствующих давлении и температуре. Объем этих паров зависит от содержания влаги в сырье и готовом экструдате, а также давления воздуха (водяных паров) в вакуумной камере.

Объем водяного пара в камере предварительного термовакуумного воздействия, образовавшегося в результате декомпрессионного взрыва, можно вычислить по формуле [1, 2]

$$V_{w1} = \frac{V_{t1} \cdot \rho_{t1} - V_{f1} \cdot \rho_{f1}}{\rho_{w1}}, \quad (4)$$

где V_{t1} и V_{f1} – объем экструдата соответственно до выхода и после выхода из фильеры агрегата в камеру предварительного термовакуумного воздействия, м³;

V_{w1} – объем водяного пара, образовавшегося в

результате декомпрессионного взрыва экструдата в камере предварительной термовакуумной обработки, м³;

ρ_{t1} и ρ_{f1} – плотность экструдата до выхода и после выхода из фильеры агрегата в камеру предварительного термовакуумного воздействия, кг/м³;

ρ_{w1} – плотность водяного пара в камере предварительного термовакуумного воздействия, кг/м³.

Объем экструдата после выхода обрабатываемого сырья из фильеры и попадания его в камеру предварительной термовакуумной обработки агрегата можно записать в виде

$$V_{f1} = V_{t1} + \Delta V_{t1}, \quad (5)$$

где ΔV_{t1} – приращение объема экструдата после выхода его из фильеры агрегата, м³.

Для камеры заключительной термовакуумной обработки можно записать аналогичное выражение с учетом параметров находящегося там экструдата

$$V_{w2} = \frac{V_{t2} \cdot \rho_{t2} - V_{f2} \cdot \rho_{f2}}{\rho_{w2}}, \quad (6)$$

где V_{t2} и V_{f2} – объем экструдата соответственно до и после входа в камеру заключительного термовакуумного воздействия, м³;

V_{w1} – объем водяного пара, образовавшегося в результате декомпрессионного взрыва экструдата в камере предварительной термовакуумной обработки, м³;

ρ_{t2} и ρ_{f2} – плотность экструдата до и после входа в камеру заключительного термовакуумного воздействия, кг/м³;

ρ_{w2} – плотность водяного пара в камере заключительного термовакуумного воздействия, кг/м³.

Объем экструдата после входа в камеру заключительного термовакуумного воздействия определяется по формуле (5) с введением в ее состав соответствующих составляющих.

В заключение следует отметить, что бъем воздуха, который необходимо удалять из камер предварительной и заключительной термовакуумной обработки агрегата следует принимать с учетом объема воздуха, впускаемого в вакуумную систему через клапан вакуум-регулятора в процессе его работы, а также воздуха, впускаемого посредством воздушных кранов камер предварительной и заключительной термовакуумной обработки.

Выводы

Приведенные в работе теоретические зависимости позволяют определить объем водяного пара в камерах предварительного и заключительного термовакуумного воздействия агрегата и с учетом ограничений в его структурной модели, обосновать основные рабочие параметры термовакуумной системы объекта исследования.

Литература

- [1] Курочкин, А.А. Определение объемного расхода сырья в экструдере с термовакуумным эффектом /А.А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 3-7.
- [2] Курочкин, А.А. Обоснование термовакуумной системы агрегата для переработки растительного сырья / А.А. Курочкин //Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. Т. 10, № 4. С. 69-74.
- [3] Курочкин, А.А. Обоснование аэродинамических параметров эжектора термовакуумного экструдера /А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3 (55). С. 12-18.
- [4] Пат. 2783914 Российская Федерация, МПК A23P10/25. Агрегат для термовакуумной экструзии растительного сырья /Курочкин А.А., Фролов Д.И., Гарькина П.К. [и др.]. – № 2021110152; заявл. 13.04.2021; опубл. 22.11.2022, Бюл. № 33. 9 с.
- [5] Экструдер с вакуумной камерой: совершенствование конструкции и технологии обработки сырья /А.А. Курочкин, Д.И. Фролов, В.М. Зимняков [и др.]. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. 263 с.

References

- [1] Kurochkin, A.A. Determination of the volumetric flow rate of raw materials in an extruder with a thermovacuum effect / A.A. Kurochkin // Izvestiya of the Samara State Agricultural Academy. 2018. No. 1. Pp. 3-7.
- [2] Kurochkin, A.A. Justification of the Thermovacuum System of the Unit for Processing Vegetable Raw Materials / A.A. Kurochkin //Izvestiya of the Samara State Agricultural Academy. 2025. Vol. 10, No. 4. Pp. 69-74.
- [3] Kurochkin, A.A. Justification of the Aerodynamic Parameters of the Ejector of a Thermovacuum Extruder / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2021. No. 3 (55). Pp. 12-18.
- [4] Pat. 2783914 Russian Federation, IPC A23R10/25. Unit for thermal vacuum extrusion of vegetable raw materials /Kurochkin A.A., Frolov D.I., Garkina P.K. [et al.]. No. 2021110152; application 04/13/2021 ; publ. 11/22/2022, Byul. No. 33. 9 p.
- [5] Extruder with a vacuum chamber: improving the design and processing technology of raw materials / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, V.M. Zimnyakov [et al.]. – Penza: Penza State Agrarian University, 2024. 263 p.

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