

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MECHANIZATION OF AGRICULTURE

УДК 631.363.285

Анализ рабочего процесса энергоэффективного экструдера

Курочкин А.А., Аширов Р.Р.

Аннотация. Автогенные экструдеры характеризуются тем, что теплота, необходимая для воздействия на перерабатываемое сырье, генерируется непосредственно в тракте машины. Такой принцип работы предполагает относительно простую и надежную конструкцию экструдера, однако делает его крайне невыгодным с позиции энергосбережения, техническим средством. В работе предложена конструктивно-технологическая схема энергоэффективного экструдера, в котором для нагрева обрабатываемого сырья предлагается использовать индукционный нагреватель. В таком экструдере работоспособность отдельных блоков в сравнении с серийно выпускаемыми машинами, оценивается с других позиций. На основе анализа конструктивно-технологической схемы и структурной модели энергоэффективного экструдера обоснованы рекомендации по проектированию основных конструктивных параметров отдельных узлов, а также режимов его рабочего процесса.

Ключевые слова: сырье, энергоэффективный экструдер, схема, модель, узлы, блоки, расход, винтовой насос.

Для цитирования: Курочкин А.А., Аширов Р.Р. Анализ рабочего процесса энергоэффективного экструдера // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10. № 2. С. 52–57.

Analysis of the working process of an energy-efficient extruder

Kurochkin A.A., Ashirov R.R.

Abstract. Autogenous extruders are characterized by the fact that the heat required to affect the processed raw materials is generated directly in the machine path. This principle of operation assumes a relatively simple and reliable design of the extruder, however, it makes it extremely unprofitable from the point of view of energy saving, a technical means. The paper proposes a design and technological scheme of an energy-efficient extruder, in which it is proposed to use an induction heater to heat the processed raw materials. In such an extruder, the performance of individual blocks in comparison with mass-produced machines is evaluated from other positions. Based on the analysis of the design and technological scheme and the structural model of an energy-efficient extruder, recommendations for the design of the main design parameters of individual units, as well as the modes of its workflow, are substantiated.

Keywords: raw materials, energy-efficient extruder, diagram, model, nodes, blocks, flow rate, screw pump.

For citation: Kurochkin A.A., Ashirov R.R. Analysis of the working process of an energy-efficient extruder. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2023. Vol. 10. No. 2. pp. 52–57. (In Russ.).

Введение

Экструзионная переработка сырья весьма распространена в сельскохозяйственном производстве и пищевых технологиях. Она реализуется с помощью устройств, в основе рабочего процесса которых лежит комбинированное механическое и тепловое воздействие на сырье с последующим его формованием. Эти устройства, объединенные общим названием «экструдеры», постоянно совершенствуются с целью устранения своего основного недостатка – высокой удельной энергоемкости технологического процесса. Особенно актуально это направление модернизации для автогенных экструдеров, в которых теплота, необходимая для воздействия на перерабатываемое сырье, генерируется непосредственно в тракте машины на крайне невыгодных с позиции энергосбережения условиях.

В последнее время появились описания экструдеров, в том числе – защищенных патентом, в которых делается попытка существенно снизить энергопотребление этого класса машин на основе отказа от преобразования механической энергии в тепловую с использованием сил сдвига и трения обрабатываемого сырья [3, 4, 6].

Цель исследований – анализ рабочего процесса модернизированного энергоэффективного экструдера на основе его конструктивно-технологической схемы и структурной модели.

Задачи исследований – разработка аналитических зависимостей для оценки работоспособности отдельных блоков модели энергоэффективного экструдера.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлась конструктивно-технологическая и структурной модели энергоэффективного экструдера.

В работе применялся аналитический метод исследований, основанный на системном подходе к рассматриваемой проблеме.

Результаты и их обсуждение

Модернизированный энергоэффективный экструдер включает следующие узлы: приемный бункер (рис. 1), измельчающее устройство, винтовой насос, нагреватель, экструзионную головку и вакуумную камеру, оснащенную одноименной системой.

Приемный бункер 4 состоит из конусной загрузочной и цилиндрической рабочей частей. Нижняя цилиндрическая часть выполнена в виде двустенной конструкции, межстенное пространство 7 которой с помощью трубопроводов соединено с вакуумным насосом 3 и вакуумной камерой 12 экструдера. С внешней стороны она, так же как и трубопровод и вакуумная камера, покрыта теплоизоляционным материалом. Для слива конденсата из межстенного пространства бункера служит сливной кран 2.

В бункере расположено измельчающее устройство, включающее подающий шнек 5, решетку 17, крестообразный нож 18 и электродвигатель 6.

В передней части экструдера расположен винтовой насос, состоящий из металлического ротора 16 и статора 8 с эластичной обкладкой. В качестве привода насоса служит мотор-редуктор 1.

В срединной части экструдера находится нагревающее устройство, выполненное в виде стальной трубы 15, охваченной индуктором 14. С целью исключения налипания сырья на поверхность нагрева трубы, она обработана материалом с хорошими антифрикционными и теплопроводящими свойствами.

Свободный торец трубы упирается в фильеру матрицы 11, представляющую собой пластину с одним или несколькими отверстиями определенного диаметра.

Индуктор 14 изготовлен в виде нескольких витков изолированного медного провода, подключенного через систему автоматического управления к силовой сети.

Вакуумная камера оборудована шлюзовым затвором и в своей верхней части подключена к

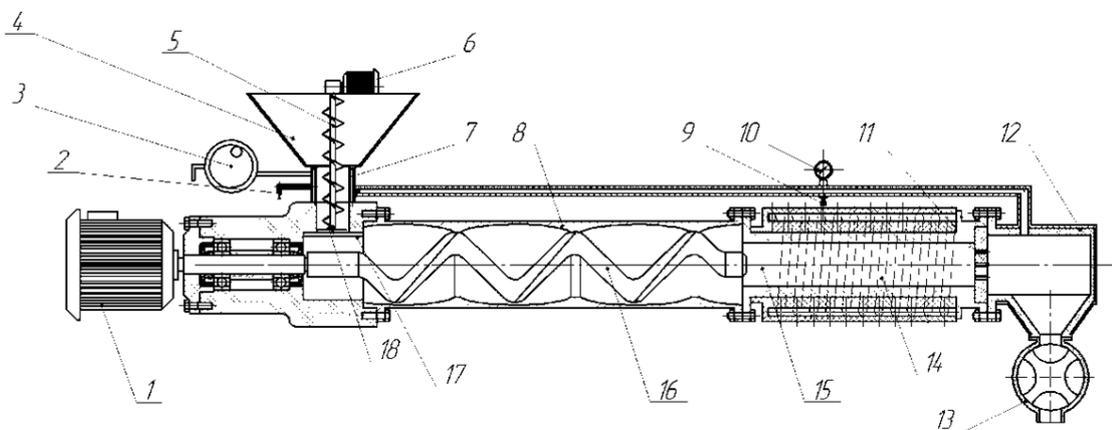


Рис. 1. Энергоэффективный экструдер: 1 – мотор-редуктор; 2 – сливной кран; 3 – вакуумный насос; 4 – приемная камера; 5 – подающий шнек; 6 – электродвигатель; 7 – межстенное пространство; 8 – статор; 9 – вакуум-регулятор; 10 – вакуум-регулятор; 11 – фильера матрицы; 12 – вакуумная камера; 13 – шлюзовый затвор; 14 – индуктор; 15 – стальная труба; 16 – ротор; 17 – решетка; 18 – крестообразный нож

вакуумной системе экструдера, в состав которой кроме насоса 3 входят вакуум-регулятор 9 и вакуум-метр 10.

Основные конструктивно-технологические параметры энергоэффективного экструдера и условия его работоспособности можно определить на основе его системного анализа.

Структурная составляющая этого анализа позволит выявить в рассматриваемой машине составные элементы и связи между ними, а функциональный подход может быть весьма полезен в части уточнения аналитических выражений, характеризующих эти связи.

Таким образом структурная модель энергоэффективного экструдера состоит из пяти относительно самостоятельных узлов (блоков): загрузки и измельчения (З), транспортирования (Тр), нагрева (Н), экструзии (Э) и вакуумной сушки (В) (рис. 2).

В качестве основных оценочных критериев работы экструдера представлены обобщённые значения результирующих факторов его блоков $y_1 \dots y_6$.

На значения оценочных критериев влияют факторы, обусловленные внутренней структурой (параметрами) каждого из блоков – $x_1 \dots x_5$.

Внешними воздействиями (входными факторами), оказывающими влияние на работу агрегата, являются обобщённые статистические показатели, характеризующие свойства сырья и готового продукта – $f_1 \dots f_5$.

Запишем основные ограничения, связанные с условием работоспособности энергоэффективного экструдера с учетом его структурной модели.

Очевидно, что первое из них связано с производительностью каждого блока, входящего с анализируемую модель

$$Q_B \geq Q_{\text{Э}} \geq Q_H \geq Q_{\text{Тр}} \geq Q_3, \quad (1)$$

где Q_B – объемный расход экструдата на выходе из вакуумной камеры, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{\text{Э}}$ – объемный расход экструдата на выходе из фильеры экструдера после «взрыва», $\text{м}^3/\text{ч}$;

Q_H – объемный расход сырья в камере нагрева, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{\text{Тр}}$ – объемный расход сырья в блоке транспортирования (подача винтового насоса), $\text{м}^3/\text{ч}$;

Q_3 – объемный расход сырья на выходе из измельчающего блока, $\text{м}^3/\text{ч}$.

При этом можно условно принять, что объемный расход сырья, подаваемого на измельчающее устройство, будет равен подаче сырья в приемный бункер, что будет обеспечиваться соответствующим дозатором.

Объемный расход экструдата на выходе из вакуумной камеры экструдера зависит от производительности шлюзового затвора и является функцией геометрических размеров рабочего органа этого узла экструдера и частоты его вращения.

Одним из основных условий работоспособности анализируемого экструдера является рациональное соотношение числа и диаметра отверстий в фильере и решетке измельчающего блока.

Объемный расход сырья на выходе из измельчающего блока можно определить на основании известной зависимости, применяемой для оценки производительности мясорубки [1, 5]

$$Q_3 = S_0 \cdot v_0 \cdot \phi, \quad (2)$$

где S_0 – суммарная площадь отверстий ножевой решетки, м^2 ;

v_0 – скорости перемещения через ножевую решетку, $\text{м}/\text{ч}$;

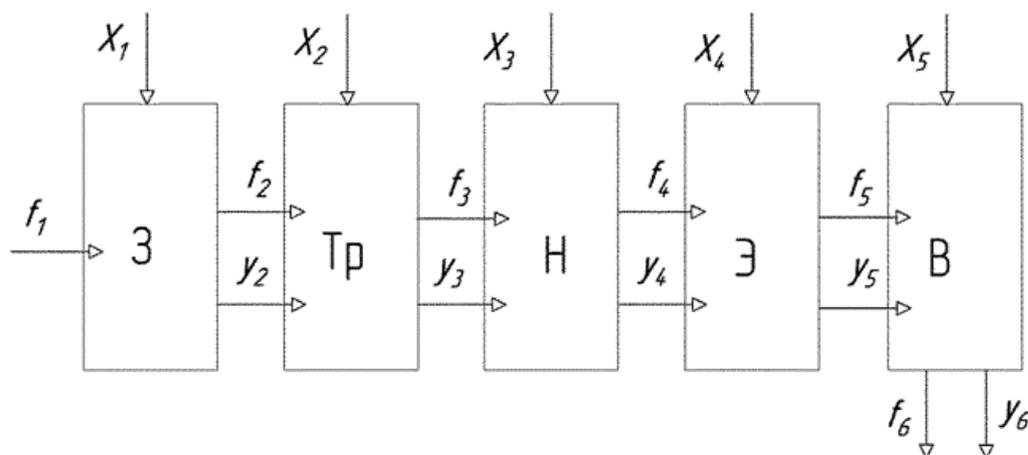


Рис. 2. Структурная модель энергоэффективного экструдера: $f_1 - f_5$ – обобщённые показатели, характеризующие сырье, поступающее в блоки экструдера, а также готового продукта, выводимого из него (f_6); $X_1 - X_5$ – обобщённые значения внутренних факторов блоков; $y_1 - y_6$ – обобщённые значения результирующих факторов блоков экструдера

ϕ – коэффициент использования площади отверстий ножевой решетки.

Суммарную площадь отверстий ножевой решетки можно определить из выражения

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot N_0}{4} \quad (3)$$

где d_0 – диаметр отверстия ножевой решетки, м;

N_0 – количество отверстий ножевой решетки;

Объемный расход экструдата на выходе из фильеры матрицы экструдера зависит от давлений в тракте машины и за ее пределами и может быть представлен следующей зависимостью [2, 4]

$$Q_{\text{Э}} = \frac{\pi \cdot R_{\text{ф}} \cdot (P_{\text{м}} - P_{\text{а}}) \cdot P_{\text{м}} \cdot N}{8 \cdot \nu \cdot l_{\text{ф}}} \quad (4)$$

где $R_{\text{ф}}$ – радиус фильеры, м;

$P_{\text{м}}$ – давление, создаваемое экструдером перед матрицей, Па;

$P_{\text{а}}$ – атмосферное давление, Па;

N – число отверстий фильеры;

ν – кинематическая вязкость экструдата, Па с;

$l_{\text{ф}}$ – длина канала фильеры, м.

В этом уравнении нет информации о скорости истечения экструдированного сырья из фильеры, в связи с чем, более логично рассматривать не объем экструдата на выходе из фильеры, а объемный расход сырья, поступающего к фильере из камеры нагрева экструдера. Этот параметр можно определить на основании следующего уравнения [7]

$$Q_{\text{Н}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2 \cdot N \cdot \nu \quad (5)$$

где D – диаметр отверстия фильеры, м;

ν – средняя скорость перемещения обрабатываемого сырья через фильеру экструдера, м/ч.

Очевидно, что средняя скорость ν зависит от отношения

$$D_0 / \sqrt{N} \quad (6)$$

Примечательно, что выбор скорости перемещения частиц экструдированного сырья через отверстие (отверстия) фильеры основан на максимальном давлении, которое может быть создано винтовым насосом с учетом приращения давления в камере

блока нагрева вследствие повышения температуры сырья под действием индукционного нагревателя.

Еще одним объектом структурного анализа рассматриваемой модели энергоэффективного экструдера являются обобщенные статистические показатели, характеризующие свойства сырья и готового экструдата. Эти показатели должны в первую очередь обеспечивать снижение влагосодержания в обрабатываемом сырье и готового продукта по мере прохождения их в каждом блоке модели экструдера.

Корректно считать, что по мере удаления влаги из сырья или готового продукта их масса будет уменьшаться. Тогда это условие можно формализовать уравнением [4]

$$M_{\text{В}} = M_{\text{Э}} - M_{\text{П}} \quad (7)$$

где $M_{\text{В}}$ – масса экструдата на выходе из вакуумной камеры, кг;

$M_{\text{Э}}$ – масса экструдата на выходе из фильеры экструдера после «взрыва», кг;

$M_{\text{П}}$ – масса жидкости, удаленной из экструдата вместе с паром, кг.

В заключительной части анализа модели энергоэффективного экструдера отметим роль его внутренней структуры.

К основным оценочным критериям, оказывающим влияние на факторы, обусловленные внутренней структурой (параметрами экструдера и вакуумной камеры), относятся температура и давление. При этом для различных блоков модели эти параметры могут быть жестко связаны между собой – на выходе из фильеры экструдера; или относительно независимы – в вакуумной камере экструдера.

Следует отметить, что степень корреляции между указанными факторами для вакуумной камеры экструдера весьма условна, и в принципе при определенных условиях эти параметры могут быть взаимозависимыми.

Таким образом, из приведенной выше информации для анализируемой модели вытекают следующие ограничения:

$$P_{\text{Н}} \gg P_{\text{Э}} \quad (8)$$

где $P_{\text{Н}}$ – давление обрабатываемого сырья в камере блока нагрева, Па;

$P_{\text{Э}}$ – давление воздуха в вакуумной камере, Па.

В связи с тем, что при атмосферном давлении вода кипит при температуре примерно 100°C, работоспособность вакуумной камеры экструдера обеспечивается достаточно высокой степенью разрежения в ее объеме. Понижение давления воздуха (повышение вакуума) в этом случае диктуется необходимостью более интенсивного «снятия» 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 2-2,5 раза по сравнению с первоначальным значением. При этом температура обрабатываемого сырья снижается на 15-20°C [3, 8].

Литература

- [1] Дипломное проектирование по механизации переработки сельскохозяйственной продукции /А.А. Курочкин, И.А. Спицын, В.М. Зимняков и др. Под ред. А.А. Курочкина. М.: КолосС, 2006. 424 с.
- [2] Курочкин, А. А. Методологические аспекты теоретических исследований пресс-экструдеров для обработки растительного крахмалсодержащего сырья / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, В. В. Новиков, С. В. Денисов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013. №6(10). С. 46-54.
- [3] Курочкин, А.А. 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. 14-20. EDN: UOHJWR
- [4] Курочкин, А. А. Определение объемного расхода сырья в экструдере с термовакuumным эффектом / А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 3-7.
- [5] Оборудование перерабатывающих производств /А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.М. Зимняков, П.К. Воронина.–М.: ИНФРА-М, 2015. 363 с. EDN: VWIOIB
- [6] Пат. 2787167 Российская Федерация МПК А23Р 30/20. Энергосберегающий экструдер / заявители: В.М. Зимняков, Ю.В. Польшянский; патентообладатель ФГОУ ВПО Пензенский ГАУ. – №2021138060; заявл. 20.12.2021; опубл. 29.12.2022, Бюл. № 1. 8 с.
- [7] Потапов, М.А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета М.А. Потапов, Д.И. Фролов, А.А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. Т. 5. № 4. С. 42-48. EDN: AFMRPP
- [8] Фролов, Д.И. Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера /Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, П.К. Гарькина [и др.] // Нива Поволжья . 2019. № 2 (51). С. 134-143. EDN: BIRIFZ

Выводы

Анализ конструктивно-технологической схемы и структурной модели энергоэффективного экструдера позволил обосновать рекомендации по проектированию основных конструктивных параметров отдельных узлов, а также режимов его рабочего процесса.

References

- [1] Diplomnoe proektirovanie po mehanizacii pererabotki sel'skhozajstvennoj produkcii /А.А. Kurochkin, I.A. Spicyn, V.M. Zimnjakov i dr. Pod red. А.А. Kurochkina. М.: KolosS, 2006. 424 p.
- [2] Kurochkin, А. А. Methodological aspects of theoretical studies of press extruders for processing vegetable starch-containing raw materials / А. А. Kurochkin, G. V. Shaburova, V. V. Novikov, S. V. Denisov // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2013. No. 6(10). pp. 46-54.
- [3] Kurochkin, А.А. Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of the modernized extruder /А.А. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Proceedings of the Samara State Agricultural Academy. 2015. No. 3. pp. 14-20.
- [4] Kurochkin, А. А. Determination of the volume consumption of raw materials in an extruder with a thermal vacuum effect / А. А. Kurochkin // Izvestiya Samara State Agricultural Academy. 2018. No. 1. pp. 3-7.
- [5] Equipment for processing industries /А.А. Kurochkin, G.V. Shaburova, V.M. Zimnyakov, P.K. Voronina. –М.: INFRA-M, 2015.363 p.
- [6] Pat. 2787167 Russian Federation IPC A23R 30/20. Energy saving extruder / Applicants: V.M. Zimnyakov, Yu.V. Polyvyany; Patent holder FGOU VPO Penza State Agrarian University. - No. 2021138060; dec. 12/20/2021; publ. 12/29/2022, Bull. No. 1. 8 p.
- [7] Potapov, M.A. Optimization of the number of holes in the matrix of a single-screw extruder for processing bird droppings M.A. Potapov, D.I. Frolov, A.A. Kurochkin // Izvestiya Samara State Agricultural Academy. 2020. Vol. 5. No. 4. pp. 42-48. EDN: AFMRPP
- [8] Frolov, D.I. Improving the efficiency of dehydration of extrudate in the vacuum chamber of an upgraded extruder / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, P.K. Garkina [et al.] // Niva of the Volga region. 2019. No. 2 (51). pp. 134-143. EDN: BIRIFZ

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>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</p>	<p>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</p>
<p>Аширов Равиль Ринатович аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p>Ashirov Ravil Rinatovich upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>