

## Совершенствование рабочего процесса экструдера на основе анализа его структурной модели

*Куручкин А.А., Потапов М.А.*

**Аннотация.** Перспективным направлением модернизации экструдеров, применяемых для обработки сырья растительного происхождения, является термовакuumное воздействие на готовый продукт при выходе его из фильеры машины. Теоретические и экспериментальные исследования механизма формирования капиллярно-пористой структуры экструдатов в машине с вакуумной камерой показали, что при таком воздействии на продукт устраняются проблемы, заложенные в «классической» экструзии и появляются перспективы дальнейшего совершенствования конструкции экструдеров на основе термовакuumного эффекта в его рабочем процессе. В статье на основе структурно-функционального подхода к экструдеру с вакуумной камерой предложена структурная модель его рабочего процесса и, на основе ее анализа сформулировано техническое решение, обеспечивающие повышение эффективности рабочего процесса объекта исследований. Полученные данные позволяют рекомендовать двухступенчатое воздействие на экструдат, осуществляемое с помощью двух последовательно установленных вакуумных камер с понижением давления по ходу перемещения обрабатываемого сырья.

**Ключевые слова:** экструдер, растительное сырье, структурно-функциональный подход, модель, экструдат, термовакuumное воздействие, вакуумная камера.

**Для цитирования:** Куручкин А.А., Потапов М.А. Совершенствование рабочего процесса экструдера на основе анализа его структурной модели // Инновационная техника и технология. 2019. № 4 (21). С. 37–41.

## Improving the working process of the extruder based on the analysis of its structural model

*Kurochkin A.A., Potapov M.A.*

**Abstract.** A promising direction of modernization of extruders used for processing raw materials of plant origin is the thermal vacuum effect on the finished product when it exits the die of the machine. Theoretical and experimental studies of the mechanism of formation of capillary-porous structure of extrudates in a machine with a vacuum chamber have shown that such an impact on the product eliminates the problems inherent in the «classical» extrusion and there are prospects for further improvement of the design of extruders based on the thermal vacuum effect in its working process. The article is based on the structural-functional approach to the extruder with a vacuum chamber of the proposed structural model of its working process and, on the basis of its analysis, formulated a technical solution that provides increased efficiency to the object of research. The obtained data allow us to recommend a two-stage impact on the extrudate, carried out with the help of two sequentially installed vacuum chambers with a decrease in pressure during the movement of the processed raw materials.

**Keywords:** extruder, vegetable raw materials, structural and functional approach, model, extrudate, thermal vacuum effect, vacuum chamber.

**For citation:** Kurochkin A.A., Potapov M.A. Improving the working process of the extruder based on the analysis of its structural model. Innovative Machinery and Technology. 2019. No.4 (21). pp. 37–41. (In Russ.).

## Введение

Одним из перспективных направлений модернизации экструдеров, используемых в пищевой промышленности, является применение принципа термовакуумного воздействия на готовый продукт при выходе его из фильеры машины. Совершенствование экструдеров в этом направлении связано, как минимум, с решением следующих проблем, сопряженных с практикой экструзии растительного сырья:

1. Возможность снижения рабочей температуры процесса до значений, обеспечивающих относительно мягкий режим обработки термолабильных ингредиентов сырья.

2. Создание условий для регенерации теплоты, затраченной на реализацию рабочего процесса машины и повышение энергоэффективности экструдера в целом.

3. Эффективное и достаточно простое регулирование обезвоживания экструдата, позволяющее отказаться от энергетически затратного процесса досушивания готового продукта.

Теоретические и экспериментальные исследования экструзионного процесса, в основе которого заложен способ воздействия на выходящий из фильеры машины продукт давлением, ниже атмосферного, реализованы в изобретениях, на которые компетентные органы Российской Федерации выдали патенты на изобретения и полезные модели [4-6].

Следующим этапом исследований в этом направлении является обоснование технических решений, позволяющих экструдерам с термовакуумным рабочим процессом обрабатывать сырье с повышенной влажностью. С этой целью предлагается использовать инструменты структурного и функционального моделирования.

Структурное моделирование считается областью системного анализа и видом моделирования, который используется как средство исследования систем и может служить для их разработки наряду

с другими методами формализованного представления – теоретико-множественными, лингвистическими, кибернетическими и т.п. [1].

Структурный подход к совершенствованию рабочего процесса экструдера оправдан тем, что он позволяет выявить в рассматриваемой системе составные элементы и связи между ними.

На основе функционального подхода предполагается обосновать и сформулировать предложения по построению модернизируемой системы.

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

## Объекты и методы исследований

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

Основой рабочего процесса экструдера с вакуумной камерой составляют операции, который выполняет серийная машины аналогичного назначения: перерабатываемое сырьё из загрузочного бункера посредством дозатора направляется в рабочую зону экструдера и, захваченное шнеком, последовательно перемещается по внутреннему тракту машины. Здесь оно измельчается, нагревается, уплотняется и, при соответствующих температуре и давлении выдавливается через фильеру матрицы за пределы машины.

Отличительным признаком модернизированного экструдера от серийного является то, что при выходе из машины экструдат поступает не в среду с атмосферным давлением, а в камеру с пониженным давлением [2].

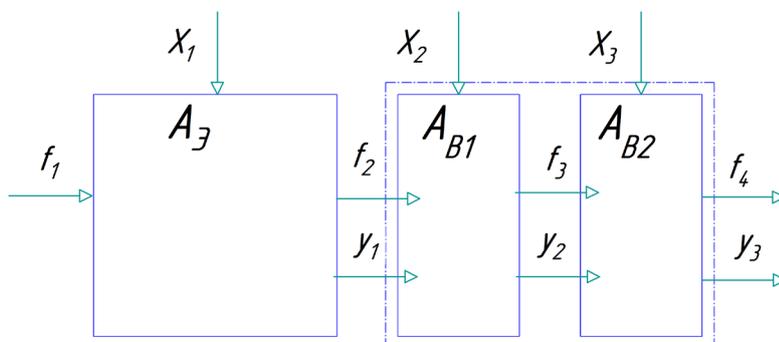


Рис. 1. Схема структурной модели функционирования экструдера:

$A_{Э}$  – экструдер;  $A_{B1}$  – первая вакуумная камера;  $A_{B2}$  – вторая вакуумная камера;  $f_1, f_2, f_3, f_4$  – обобщённые показатели, характеризующие сырьё, поступающее в экструдер, первую и вторую вакуумные камеры и продукт на выходе из машины;  $X_1, X_2, X_3$  – обобщённые значения внутренних факторов соответственно экструдера и вакуумных камер;  $Y_1, Y_2, Y_3$  – обобщённые значения результирующих факторов экструдера и вакуумных камер

При таком давлении кипение воды, находящейся в продукте происходит при температуре, меньшей, чем это происходит при работе серийного экструдера. Тем самым, снижается расход электроэнергии, необходимой для нагрева сырья, а также обеспечивается более мягкий режим воздействия на термолабильные ингредиенты получаемого экструдата. Интенсивное вскипание жидкости, находящейся в экструдате, приводит к значительному снижению его температуры с одновременным снижением влажности готового продукта. В том случае, если необходимо получить продукт с пониженной влажностью или обрабатывается сырье с большим содержанием воды, экструдат с помощью шлюзового затвора перемещается во вторую камеру.

Схема структурной модели функционирования экструдера с двумя камерами для термовакуумной обработки получаемого экструдата приведена на рисунке.

Анализ схемы показывает, что основными оценочными критериями работы экструдера являются обобщенные значения результирующих факторов

экструдера и двух вакуумных камер ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ), которые характеризуют производительность экструдера (объемный расход экструдата в зонах функционирования перечисленных устройств).

Основными внешними воздействиями (входными факторами), оказывающими влияние на работу экструдера, 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 экструдера и вакуумных

камер –  $X_1, X_2, X_3$ .

Конечной целью системного анализа является определение оптимальных, либо рациональных

значений факторов  $X_1, X_2, X_3$  с целью доведения

показателя  $Y_3$  до оптимального, а при невозможности – до рационального.

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

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

$$Q_{B2} \geq Q_{B1} \geq Q_{\text{Э}}, \quad (1)$$

где  $Q_{B2}$  – объемный расход экструдата на выходе из второй вакуумной камеры, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{B1}$  – объемный расход экструдата на выходе из первой вакуумной камеры, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{\text{Э}}$  – объемный расход экструдата на выходе из фильеры экструдера после «взрыва», м<sup>3</sup>/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:

$$M_{\text{Э}} \geq M_{B1} \geq M_{B2}, \quad (2)$$

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

$M_{B1}$  – масса экструдата на выходе из первой вакуумной камеры, кг;

$M_{B2}$  – масса экструдата на выходе из второй вакуумной камеры, 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 экструдера. Следует особо отметить, что независимость между температурой экструдата и давлением в вакуумных камерах экструдера весьма условна, и в принципе при определенном условии эти параметры могут быть тесно взаимосвязаны. Этим условием является факт кипения жидкости, находящейся в экструдате, при соответствующем давлении в вакуумных камерах машины.

Приведенная выше информация накладывает для анализируемой модели следующее ограничение:

$$P_{B2} > P_{B1}, \quad (3)$$

где  $P_{B1}$  – пониженное давление воздуха в первой вакуумной камере (вакуум), кПа;

$P_{B2}$  – пониженное давление воздуха во второй вакуумной камере (вакуум), кПа.

В связи с тем, что при атмосферном давлении вода кипит при температуре примерно 100°C, работоспособность первой вакуумной камеры экструдера обеспечивается незначительной степенью разрежения в ее объеме – 10–20%. Понижение давления воздуха (повышение вакуума) в этом случае диктуется главным образом необходимостью более интенсивного «снятия» влагосодержания экструдата за один цикл обработки сырья. Эксперименталь-

ными 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 20–30°C [3, 5].

Таким образом, для экструдеров с одной вакуумной камерой имеются ограничения, связанные с влажностью обрабатываемого сырья. Не менее важен и тот факт, что сырье с повышенным содержанием воды существенно ограничивает величину давления, создаваемого шнеком машины на выходе из ее внутреннего тракта.

В связи с этим логично предположить, что одним из возможных решений данной проблемы может быть применение в рабочем процессе экструдера второй вакуумной камеры. При этом с целью получения условий для интенсивного кипения жидкости в экструдате, следует обеспечить в данной ка-

мере достаточно высокий вакуум (низкое абсолютное давление) – примерно 60–70 кПа.

### Выводы

В заключение можно сделать вывод о том, что полученные данные позволяют рекомендовать двухступенчатое воздействие на экструдат, осуществляемое с помощью двух последовательно установленных в экструдере вакуумных камер, с понижением давления в каждой из них по ходу перемещения обрабатываемого сырья.

На основании анализа предложенной схемы структурной модели модернизированной машины приведены сведения о составе основных элементов экструдера с двумя вакуумными камерами, а также обосновано численное значение рабочего давления в этих камерах.

### Список литературы

- [1] Алонцева Е. Н. Структурное моделирование процессов и систем. /Е.Н. Алонцева, А.Н. Анохин, С.П. Саакян. Учебное пособие по курсу «CASE и CALS технология». Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. 72 с.
- [2] Инновации в пищевой экструзии /А.А. Курочкин, П.К. Гарькина, А.А. Блинохватов и др. Пенза: РИО ПГАУ, 2018. 247 с.
- [3] Patent US 7001636 B1 Method for manufacturing feed pellets and a plant for use in the implementation of the method. /Odd Geir Oddsen, Harald Skjorshammer, Fred Hirth Thorsen – №09/937172; Pub. 21.02.2006.
- [4] Пат. 2561934 Российская Федерация МПК7 В29С47/12. Экструдер с вакуумной камерой / заявители: Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, Р.В. Шабнов, А.А. Курочкин, В.А. Авроров; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Пензенский ГТУ. № 2014125348; заявл. 23.06.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25. 7с.
- [5] Пат. 189317 Российская Федерация СПК В29С 48/00. Экструдер с вакуумной камерой /заявители: П.К. Гарькина, В.М. Зимняков, А.А. Курочкин, О.Н. Кухарев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Пензенский ГАУ. № 2019105424; заявл. 26.02.2019; опубл. 22.05.2019, Бюл. № 19. 7с.
- [6] Пат. 192684 Российская Федерация СПК В29С 48/00. Экструдер с вакуумной камерой /заявители: А.А. Курочкин, П.К. Гарькина, Д.И. Фролов, А.А. Блинохватов, М.А. Потапов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Пензенский ГТУ. № 2019118768; заявл. 17.06.2019; опубл. 26.09.2019, Бюл. № 27. 7с.

### References

- [1] Alontseva E. N. Structural modeling of processes and systems. / E.N. Alontseva, A.N. Anokhin, S.P. Sahakyan. Textbook for the course «CASE and CALS technology». Obninsk: IATE NRNU MEFhI. 2015. 72 p.
- [2] Innovations in food extrusion /A.A. Kurochkin, P.K. Garkina, A.A. Blinohvatov et al. Penza: RIO PGAU. 2018. 247 p.
- [3] Patent US 7001636 B1 Method for manufacturing feed pellets and a plant for use in the implementation of the method. / Odd Geir Oddsen, Harald Skjorshammer, Fred Hirth Thorsen. No. 09/937172; Pub. 02.21.2006.
- [4] Pat. 2561934 Russian Federation IPC7 V29 C47/12. Vacuum chamber extruder / Applicants: G.V. Shaburova, P.K. Voronina, R.V. Shabnov, A.A. Kurochkin, V.A. Aurorov; applicant and patent holder FGOU VO Penza State Technical University. No. 2014125348; declared 06/23/2014; publ. 09/10/2015, Bull. No. 25. 7 p.
- [5] Pat. 189317 Russian Federation SEC B29C 48/00. Vacuum chamber extruder /Applicants: P.K. Garkina, V.M. Zimnyakov, A.A. Kurochkin, O.N. Kuharev; applicant and patent holder FGOU VO Penza GAU. No. 2019105424; declared 02/26/2019; publ. 05/22/2019, Bull. No. 19. 7 p.

- [6] Pat. 192684 Russian Federation SEC B29C 48/00. Vacuum chamber extruder /Applicants: A.A. Kurochkin, P.K. Garkina, D.I. Frolov, A.A. Blinohvatov, M.A. Potapov; applicant and patent holder FGOU VO Penza State Technical University. No. 2019118768; declared 06/17/2019; publ. 09/26/2019, Bull. No. 27. 7 p.

**Сведения об авторах**

**Information about the authors**

<p><b>Курочкин Анатолий Алексеевич</b>                  доктор технических наук                  профессор кафедры «Пищевые производства»                  ФГБОУ ВО «Пензенский государственный                  технологический университет»                  440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11  <b>Тел.:</b> +7(927) 382-85-03  <b>E-mail:</b> anatolii_kuro@mail.ru</p>	<p><b>Kurochkin Anatoly Alekseevich</b>                  D.Sc. in Technical Sciences                  professor at the department of «Food productions»                  Penza State Technological University  <b>Phone:</b> +7(927) 382-85-03  <b>E-mail:</b> anatolii_kuro@mail.ru</p>
<p><b>Потанов Максим Александрович</b>                  аспирант кафедры «Пищевые производства»                  ФГБОУ ВО «Пензенский государственный                  технологический университет»                  440045, Пенза, ул. Ульяновская, д. 36, кв. 37  <b>Тел.:</b> +7(962) 473-86-96  <b>E-mail:</b> torrentskachat@mail.ru</p>	<p><b>Potapov Maxim Alexandrovich</b>                  postgraduate student of the department «Food productions»                  Penza State Technological University  <b>Phone:</b> +7(962) 473-86-96  <b>E-mail:</b> torrentskachat@mail.ru</p>