

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУДЕРА С ТЕРМОВАКУУМНЫМ ЭФФЕКТОМ

Курочкин Анатолий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Пищевые производства», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440061, г. Пенза, ул. Герцена, 44.

E-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Ключевые слова: экструдер, обезвоживание, камера, эффект, расход, термовакuumный, объемный.

Цель исследований – теоретическое обоснование повышения эффективности обезвоживания экструдата за счет подачи воздуха в вакуумную камеру модернизированного экструдера с термовакuumным рабочим процессом. На основе современных представлений о характере реализации термодинамического процесса при взаимодействии трех различных потоков воздуха в ограниченном объеме вакуумной камеры экструдера теоретически обоснован один из возможных путей повышения эффективности обезвоживания готового продукта. В ранее предложенной конструктивно-технологической схеме экструдера недостаточно интенсивное обезвоживание выходящего из фильеры машины готового продукта связано с относительно низкой скоростью воздушного потока у поверхности остывающего экструдата. Эта скорость ограничивает интенсивность переноса удаляемой из экструдата жидкости посредством влажного пара, который из вакуумной камеры экструдера выводится в вакуум-баллон и конденсируется. В модернизированном экструдере воздействие термовакuumного эффекта предлагается усилить за счет дозированной подачи воздуха в рабочий объем вакуумной камеры экструдера. Проведенные исследования позволили получить аналитические выражения, с помощью которых можно определить объемный расход впускаемого в вакуумную камеру машины воздуха и определить его влияние на основные конструктивно-технологические параметры системы, обеспечивающей термовакuumный эффект процесса экструдирования. Показана связь коэффициента, учитывающего влияние термовакuumного эффекта в автогенном экструдере, с другими значимыми техническими и технологическими параметрами машины. Полученные результаты могут быть полезны и учтены в процессе последующих теоретических исследований экструдеров с вакуумной камерой и позволят на их основе повысить эффективность работы машин, осуществляющих термовакuumную экструзию сырья растительного происхождения.

IMPROVEMENT OF EXTRUDER WORKING PROCESS WITH TERMOVACUAL EFFECT

A. A. Kurochkin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Food production», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, Baydukova travel/Gagarin street, 1A /11.

E-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Keywords: extruder, dehydration, chamber, effect, flow rate, thermal vacuum, volumetric.

The research aim is a theoretical substantiation of the increase in the efficiency of extrudate dehydration due to the supply of air into the vacuum chamber of a modernized extruder with a thermal vacuum working process. On the basis of modern study of the implementation of the thermodynamic process in the interaction of three different air flows in a limited volume of the vacuum chamber of the extruder, one possible way of increasing the efficiency of the finished product dehydration was theoretically justified. In the previously proposed constructive-technological scheme of the extruder, the insufficiently intensive dehydration of the finished product leaving the die of the machine is associated with a relatively low air flow rate at the surface of the cooling extruder. These speed limits the transfer rate of the liquid removed from the extruder by means of wet steam, which is withdrawn from the vacuum chamber of the extruder into a vacuum balloon and condenses. In a modernized extruder, the effect of thermal vacuum effect is proposed to be enhanced by means of a metered supply of air into the working volume of the extruder's vacuum chamber. The conducted research allowed obtaining analytical expressions with the help of which it is possible to determine the volumetric flow rate of air injected into the vacuum chamber of the machine and to determine its effect on the main structural and technological parameters of the system that ensures the thermal vacuum effect of the extrusion process. The relationship between the coefficient taking into account the influence of the thermal vacuum effect in an autogenous extruder on other significant technical and technological parameters of the machine is shown. The results obtained can be useful and considered in the course of subsequent theoretical studies of extruders with a vacuum

chamber and will allow on their basis increasing the efficiency of the machines performing the thermal vacuum extrusion of raw materials of plant origin.

Известно, что рабочий процесс автогенного одношнекового экструдера с позиции термодинамической теории основан на использовании теплоты, генерируемой непосредственно в тракте машины, за счет диссипации механической энергии. Промежуточным звеном сложного преобразования электрической энергии привода экструдера в тепловую выступает механическая энергия сил сдвига и трения обрабатываемого сырья в процессе его взаимодействия с рабочим органом машины. С учетом того, что большая часть энергии, затрачиваемой на обеспечение рабочего процесса автогенного экструдера при обработке пищевого сырья растительного происхождения, расходуется на повышение его температуры, следует признать, что фактор, характеризующий расход теплоты, является доминирующим в технических решениях, направленных на повышение энергоэффективности данного класса машин.

Исследование основных закономерностей образования капиллярно-пористой структуры экструдатов из растительного сырья позволило теоретически обосновать способ повышения энергоэффективности экструзионных технологий за счет термовакуумного воздействия на получаемый продукт в момент выхода его из фильеры матрицы машины [1].

При этом теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что рабочий процесс экструдеров, основанный на термовакуумном эффекте, позволяет обеспечить требуемый коэффициент взрыва экструдата при меньшем давлении и, соответственно, температуре, чем в серийных машинах, что существенно повышает их энергоэффективность [2, 3].

Теоретический анализ конструктивно-технологической схемы ранее предложенного экструдера с вакуумной камерой [7] позволил выявить недостатки, препятствующие более полной реализации всех преимуществ термовакуумного эффекта. Эти недостатки можно свести к следующему:

1. Недостаточно эффективное обезвоживание экструдата.

2. Зависимость отдельных показателей экструдера от температуры внешней среды, проявляющаяся в том, что интенсивность конденсации водяного пара в вакуум-баллоне экструдера зависит от температуры в производственном помещении. В летний период года теплота этого пара расходуется на нагрев стенок вакуумной камеры и способствует возникновению опасного производственного фактора при эксплуатации экструдера. В холодное время года за счет этой теплоты в определенном интервале повышается температура воздуха в производственном помещении, при этом некоторая часть пара будет конденсироваться непосредственно в вакуумной камере экструдера. Данный недостаток устраняется относительно просто за счет того, что вакуумная камера экструдера, а также трубопровод, соединяющий ее с вакуум-баллоном, покрываются теплоизоляционным материалом, например путем напыления на их наружную поверхность утеплителя PENOPLEX.

Базовый недостаток, связанный с недостаточной эффективностью обезвоживания экструдата, объясняется относительно низкой скоростью воздушного потока у поверхности экструдата, что в свою очередь ограничивает интенсивность переноса удаляемой из экструдата жидкости посредством влажного пара, перемещающегося из вакуумной камеры экструдера в вакуум-баллон. Решение этой проблемы в сравнении с применением теплоизоляции требует более сложного подхода и связано с теоретическими исследованиями взаимосвязи расхода впускаемого в вакуумную камеру экструдера воздуха и основными конструктивно-технологическими параметрами машины.

Цель исследований – теоретическое обоснование повышения эффективности обезвоживания экструдата за счет подачи воздуха в вакуумную камеру модернизированного экструдера с термовакуумным рабочим процессом.

Задачи исследований – получение аналитических зависимостей, позволяющих оценить влияние дополнительной подачи воздуха в вакуумную камеру модернизированного экструдера на эффективность его работы.

Материалы и методы исследований основаны на термодинамических характеристиках водяного пара, а также уравнении баланса массы обрабатываемого сырья, находящегося в тракте экспериментального экструдера и его вакуумной камере.

Результаты исследований. Результаты ранее выполненных теоретических исследований позволили обосновать и предложить новое техническое решение экструдера, обеспечивающего в процессе своей работы более эффективное обезвоживание экструдата. С этой целью вакуумную камеру экструдера предлагается оснастить воздушным краном для подачи в нее определенного объема воздуха, что в свою очередь интенсифицирует процесс отвода влажного пара от поверхности экструдата и дальнейшее его перемещение в вакуум-баллон. При этом воздушный кран рационально расположить в противоположной стороне от патрубка, соединяющего камеру с системой отвода и конденсации влаги.

Предлагаемый экструдер (рис. 1) состоит из загрузочного бункера 1, корпуса 2, шнека 3, фильеры матрицы 4, режущего устройства (на рисунке не показано) и вакуумной камеры 5.

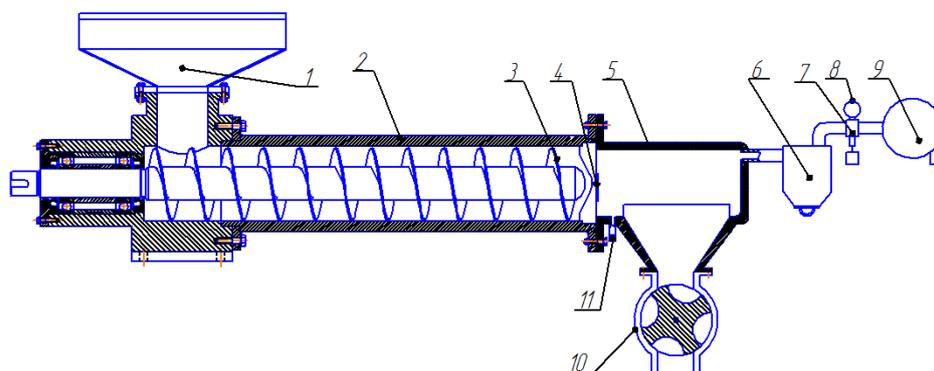


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема предлагаемого экструдера:

1 – загрузочный бункер; 2 – корпус; 3 – шнек; 4 – фильера матрицы; 5 – вакуумная камера; 6 – вакуум-баллон; 7 – вакуум-регулятор; 8 – вакуум-метр; 9 – вакуумный насос; 10 – шлюзовой затвор; 11 – воздушный кран

Вакуумная камера включает в себя шлюзовой затвор 10, а также систему отвода и конденсации влаги, в которую входят вакуум-баллон 6, вакуумный насос 9, вакуум-регулятор 7 и вакуум-метр 8.

Шлюзовой затвор 10 служит для выгрузки получаемого продукта без разгерметизации вакуумной камеры экструдера и представляет собой корпус цилиндрической формы с вращающимся в нем многолопастным ротором.

Вакуум-насос 9 обеспечивает в вакуумной камере экструдера необходимую величину пониженного давления (вакуума).

Вакуум-баллон 6 служит для сглаживания колебаний вакуума в системе, а также конденсации влаги, отводимого из камеры 5 горячего воздуха (водяного пара). С целью периодического удаления конденсата из вакуум-баллона 6, он оснащен шарнирно закрепленной крышкой с уплотняющим элементом (на рисунке позиция не обозначена).

Вакуум-регулятор 7 необходим для поддержания пониженного давления в вакуумной камере 5 в заданных пределах при требуемой производительности машины, а также влажности обрабатываемого сырья и готового продукта.

Для контроля давления в вакуумной камере экструдера служит вакуум-метр 8.

Рабочий процесс экструдера с вакуумной камерой осуществляется следующим образом. Обрабатываемое сырье поступает в загрузочный бункер 1 экструдера. Захваченное шнеком 3, оно последовательно перемещается через зоны прессования и дозирования машины, нагревается до температуры 120-130°C и выводится через фильеру матрицы 4 в вакуумную камеру 5. При выходе из фильеры экструдат с помощью режущего устройства разрезается на частицы заданной длины.

Попадая из области высокого давления (во внутреннем тракте экструдера) в зону низкого давления (в вакуумную камеру 5), сырье подвергается мощному декомпрессионному взрыву, который представляет собой процесс мгновенного перехода воды, находящейся в сырье, в пар. Следует особо

отметить, что в процессе перехода воды в газообразное состояние и испарения ее с поверхности, а также с более глубоких слоев экструдата, продукт охлаждается примерно на 20-30°C.

Образующийся горячий пар с помощью вакуумного насоса 9 перемещается в вакуум-баллон 6, где конденсируется и в виде жидкости стекает в его нижнюю часть. С целью интенсификации отвода влажного пара с поверхности экструдата и дальнейшего его перемещения в вакуум-баллон 6 в камеру 5 с помощью воздушного крана 11 подается воздух.

Содержание влаги в экструдированном продукте регулируют за счет давления в вакуумной камере 5 с помощью вакуум-регулятора 7, а также величиной подсоса воздуха посредством воздушного крана 11 камеры 5.

Рассмотрим условия рациональной реализации технического решения экструдера в теоретическом аспекте.

Расчётная схема функционирования вакуумной камеры экструдера в период установившегося рабочего процесса представлена на рисунке 2. Будем считать, что объем камеры будет постоянным, а соотношение рабочего давления в камере и за ее пределами (атмосферного) не превышает критического значения ($\frac{P}{P_a} = 0,578$).

При откачивании воздуха из камеры объёмом V через отверстие с поперечным сечением f_1 количество воздуха будет уменьшаться на величину dG_1 . И, напротив, при впуске воздуха посредством воздушного крана, его количество будет увеличиваться. Количество впускаемого воздуха через отверстие с площадью поперечного сечения f_2 обозначим через dG_2 .

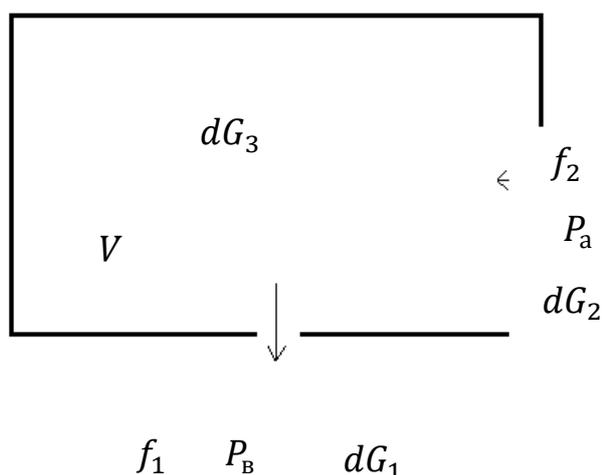


Рис. 2. Расчётная схема вакуумной камеры экструдера

Примем условие, что количество жидкости, содержащейся в обрабатываемом сырье, определяется его исходной влажностью. При выходе из фильеры матрицы экструдера часть этой жидкости превращается в водяной пар, который необходимо удалить из камеры, а часть остается в полученном экструдате. Содержание жидкости, переходящей в пар, зависит от многих параметров экструзионного процесса и регулируется в зависимости от требуемой влажности получаемого экструдата. В принятой модели водяной пар в количестве dG_3 поступает в вакуумную камеру экструдера.

Количество воздуха, откачиваемого из вакуумной камеры экструдера, равно [4]

$$dG_1 = P_B^{\frac{1}{K}} \cdot f_1 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P^m - P_B^m} dt, \quad (1)$$

где P_B – давление воздуха в вакуумной камере, Па;

K – показатель адиабаты;

f_1 – площадь поперечного сечения вакуум-провода, м²;

μ – коэффициент расхода воздуха в вакуумной камере;

a – безразмерный коэффициент, равный $\sqrt{\frac{2gK}{K-1} \cdot C^{-\frac{1}{K}}}$;

m – коэффициент, характеризующий адиабатический процесс и равный $\frac{K-1}{K}$;

C – величина, характеризующая отношение рабочего давления воздуха к его удельному весу (P_B/Y_B);

P – рабочее давление воздуха в вакуумной системе экструдера, Па;

$d\tau$ – бесконечно малый промежуток времени истечения воздуха в вакуумной камере.

Количество воздуха, поступающее в вакуумную камеру экструдера через воздушный кран, можно определить по формуле [4]

$$dG_2 = P^{\frac{1}{K}} \cdot f_2 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P_a^m - P^m} d\tau, \quad (2)$$

где P_a – атмосферное давление, Па;

f_2 – площадь поперечного сечения воздушного крана, м².

На основании уравнения материального баланса воздуха в вакуумной камере экструдера (в дифференциальной форме)

$$dG_1 = dG_2 + dG_3 \quad (3)$$

и формул для определения расхода при откачивании (1) и впуске воздуха (2), определим количество водяного пара, которое необходимо удалить из вакуумной камеры экструдера,

$$dG_3 = dG_1 - dG_2 = P_B^{\frac{1}{K}} \cdot f_1 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P^m - P_B^m} d\tau - P^{\frac{1}{K}} \cdot f_2 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P_a^m - P^m} d\tau. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что количество водяного пара, которое необходимо удалить из вакуумной камеры экструдера, зависит от следующих параметров:

– площадей поперечного сечения вакуумпровода (f_1) и воздушного крана (f_2);

– давления в вакуумной системе экструдера (P_B), рабочего давления воздуха в вакуумной системе экструдера (P) и величины атмосферного давления (P_a);

– коэффициента расхода воздуха в вакуумной камере экструдера μ .

При этом коэффициент расхода воздуха в вакуумной камере учитывает взаимодействие четырех коэффициентов:

– коэффициентов скорости, характеризующих сопротивление истечению воздуха из отверстий с площадями сечения (f_1) и (f_2);

– коэффициента сжатия, характеризующего уменьшение поперечного сечения струи воздуха по сравнению с площадями сечения (f_1) и (f_2);

– коэффициента, характеризующего полноту сжатия струи воздуха в зависимости от расположения воздушного крана в вакуумной камере;

– коэффициента, учитывающего форму сопла воздушного крана, отличную от теоретически принятого круглого отверстия.

Уравнение (4) с учетом ранее полученных результатов исследований автора [4-6] позволяет с достаточной для практического применения точностью определять и анализировать практически все конструктивно-технологические параметры вакуумной камеры. При этом в зависимости от цели и точности расчетов следует предварительно определиться с методом оценки количества водяных паров, образующихся в вакуумной камере в результате декомпрессионного взрыва воды в обрабатываемом сырье.

Например, количество водяного пара, которое необходимо удалить из вакуумной камеры экструдера, можно определить из уравнения баланса массы экструдата, находящегося в тракте машины (до выхода из фильеры), и массы экструдата после выхода из фильеры [6]:

$$G_w = G_t - G_f = V_t \cdot \rho_t - V_f \cdot \rho_f \quad (5)$$

где G_t и G_f – масса экструдата соответственно до выхода и после выхода из фильеры экструдера, кг;

V_t и V_f – объем экструдата соответственно до выхода и после выхода из фильеры экструдера, м³;

ρ_t и ρ_f – плотность экструдата до выхода и после выхода из фильеры экструдера, кг/м³.

С учетом того, что $G_f = \varepsilon \cdot \Delta V_t$ [5], можно записать

$$\varepsilon = \frac{V_t \cdot \rho_t - V_w \cdot \rho_w}{\Delta V_t}, \quad (6)$$

где ε – коэффициент, учитывающий влияние термовакuumного эффекта на приращение объема экструдата после выхода его из фильеры экструдера;

ΔV_t – приращение объема экструдата после выхода его из фильеры экструдера, м³.

Тогда количество водяных паров, которое необходимо удалить из вакуумной камеры экспериментального экструдера, определяется следующей формулой

$$G_w = G_t - \varepsilon \cdot \Delta V_t. \quad (7)$$

Другим возможным вариантом практического применения полученных в работе результатов может быть определение экспериментальными методами численных значений входящих в формулу (4) параметров для каждого частного случая предлагаемой конструктивно-технологической схемы экструдера.

Заключение. Полученные теоретические зависимости позволяют получить материальный баланс воздуха в вакуумной камере модернизированного экструдера и определить влияние его отдельных составляющих на основные конструктивно-технологические параметры системы, обеспечивающей термовакuumный эффект процесса экструдирования.

Библиографический список

1. Курочкин, А. А. Инновации в экструзии / А. А. Курочкин, П. К. Гарькина, А. А. Блинохватов [и др.]. – Пенза : РИО ПГАУ, 2018. – 247 с.
2. Курочкин, А. А. Системный подход к разработке экструдера для термовакuumной обработки экструдата / А. А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4 (01). – С. 17-22.
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. 15-20.
4. Курочкин, А. А. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера / А. А. Курочкин, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2015. – № 4 (32). – С. 172-177.
5. 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.
6. Курочкин, А. А. Влияние объемного расхода сырья на подачу вакуумного насоса модернизированного экструдера / А. А. Курочкин, С. В. Чекайкин // Инновационная техника и технология. – 2018. – № 3 (16). – С. 20-24.
7. Пат. 2561934 Российская Федерация, МПК А23Р1/12, В29С47/38. Экструдер с вакуумной камерой / Шабурова Г. В., Воронина П. К., Шабнов Р. В. [и др.]. – № 2014125348/13 ; заявл. 23.06.2014 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 25. – 7 с.

References

1. Kurochkin, A. A., Garkina, P. K., & Blinkers, A. A. et al. (2018). Innovatsii v ehkstruzii [Innovation in extrusion]. Penza: PC Penza SAU [in Russian].
2. Kurochkin, A. A. (2014). Sistemnyi podhod k razrabotke ehkstrudera dlia termovakuumnoi obrabotki ehkstrudata [A system approach to the development of an extruder for thermal vacuum processing of an extrudate]. *Innovatsionnaia tekhnika i tekhnologiya – Innovative machinery and technology*, 4 (01), 17-22 [in Russian].
3. Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V., Frolov, D. I., & Voronina, P. K. (2015). Teoreticheskoe obosnovanie termovakuumnogo ehffekta v rabochem protsesse modernizirovannogo ehkstrudera [Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of a modernized extruder]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii – Bulletin Samara state agricultural academy*, 3, 15-20 [in Russian].
4. Kurochkin, A. A., Frolov, D. I., & Voronina, P. K. (2015). Opredeleniie osnovnykh parametrov vakuumnoi kamery modernizirovannogo ehkstrudera [Determination of the main parameters of the vacuum chamber of a modernized extruder]. *Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii – Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*, 4 (32), 172-177 [in Russian].
5. Kurochkin, A. A. (2018). Opredeleniie obiemnogo raskhoda syria v ehkstrudere s termovakuumnym ehffektom [Determination of volumetric consumption of raw materials in an extruder with a thermal vacuum effect]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii – Bulletin Samara state agricultural academy*, 1, 3-7 [in Russian].
6. Kurochkin, A. A., & Chekaikin, S. V. (2018). Vliyanie obiemnogo raskhoda syria na podachu vakuumnogo nasosa modernizirovannogo ehkstrudera [The influence of the volumetric consumption of raw materials on the supply of a

vacuum pump of a modernized extruder]. *Innovacionnaia tekhnika i tekhnologija – Innovative machinery and technology*, 3 (16), 20-24 [in Russian].

7. Shaburova, G. V., Voronina, P. K., & Shabnov, R. V. et al. (2015). Ekhstruder s vakuumnoi kameroi [Extruder with a vacuum chamber]. *Patent 2561934 Russian Federation, IPC A23P1/12, B29C47/38, №2014125348/13* [in Russian].