

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЭКСТРУДЕРА

Курочкин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»

Фролов Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые производства»

Воронина Полина Константиновна, старший преподаватель кафедры «Пищевые производства»

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет»
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 8(8412)49-56-99;
e-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Ключевые слова: пористость, экструдеры, экструзия, объем, вакуумная сушка.

В работе представлены результаты теоретических исследований по определению основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера. Получена аналитическая зависимость давления в вакуумной камере экструдера от содержания влаги в обрабатываемом сырье и готовом продукте, площади поперечного сечения вакуумпровода, объема камеры и давления в вакуумной системе экструдера.

Введение

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что пористая структура экструдатов, получаемых из растительного крахмалсодержащего сырья, предопределяет такие их свойства, как набухаемость, водо- и жиродерживающая способности, растворимость, коэффициент расширения и др., которые в свою очередь влияют на текстуру, усвояемость и качество готовых продуктов [1, 2, 3, 4, 5].

При этом также известно, что формирование пористой макроструктуры экструдатов в определяющей степени зависит от содержания крахмала в сырье и «взрывного» испарения воды при выходе обрабатываемого материала из фильеры матрицы

машины [6, 7].

В связи с тем, что в условиях пониженного давления вода испаряется при температуре, которая существенно ниже температуры парообразования при атмосферном давлении, необходимая интенсивность декомпрессионного воздействия на экструдруемое сырье может быть обеспечена за счет замены атмосферного давления, действующего на экструдат при выходе его из фильеры, на пониженное давление (вакуум) [8, 9].

Данная научная концепция реализована практически в разработанном нами экструдере (рис. 1), который состоит из загрузочной камеры, корпуса, шнека, фильеры, вакуумной камеры, шлюзового затвора и

вакуум-насоса.

Вакуумная камера экструдера, включающая в себя режущее устройство, вакуумную систему и шлюзовой затвор, расположена соосно шнеку и фильере матрицы.

Режущее устройство (на рис. 1 не показано) выполнено в виде одного или нескольких вращающихся ножей, закрепленных на корпусе экструдера в месте выхода экструдата из фильеры.

В вакуумную систему экструдера входят вакуум-насос, вакуум-регулятор и вакуум-баллон. Вакуум-насос необходим для создания в вакуумной камере экструдера пониженного (ниже атмосферного) давления. Вакуум-регулятор служит для поддержания пониженного давления в вакуумной камере экструдера в заданных пределах для обеспечения необходимой производительности машины, а также получения готового продукта с различным содержанием воды.

Для предохранения насоса от попадания в него жидкости, а также сбора конденсата и выравнивания разрежения в вакуумной линии, между ней и насосом устанавливают вакуум-баллон.

Шлюзовой затвор служит для непрерывного отвода полученного экструдата за пределы вакуумной камеры без ее разгерметизации.

Принцип работы экструдера с вакуумной камерой заключается в следующем. Исходное сырьё из загрузочной камеры направляется в шнековую часть экструдера. Захваченный шнеком продукт последовательно проходит все рабочие зоны машины и через фильеру матрицы поступает в вакуумную камеру.

В условиях быстрого перехода экструдата из области высокого давления в условия пониженного давления происходит декомпрессионный взрыв: вода, находящаяся в продукте, переходит в парообразное состояние с выделением значительного количества энергии. Происходит деструкция кле-

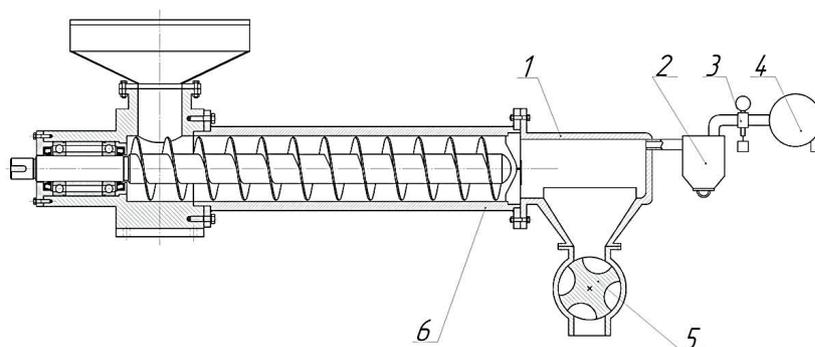


Рис. 1 - Экструдер с вакуумной камерой:

1 – вакуумная камера; 2 – вакуум-баллон; 3 – вакуум-регулятор; 4 – вакуум-насос; 5 – шлюзовой затвор; 6 – экструдер

точных структур обрабатываемого сырья, и получается высокопористый продукт.

Экструдат при выходе из фильеры матрицы с помощью режущего устройства разрезается на частицы размером 1,0...4,0 мм.

Продолжительность обработки сырья в экструдере составляет 15...25 с при температуре 100...110 °С. Содержание влаги в экструдированном продукте регулируется за счет давления в вакуумной камере с помощью вакуум-регулятора [7, 8].

Цель работы – теоретическое исследование рабочего процесса вакуумной камеры модернизированного экструдера.

Задачи исследования – определить аналитическими методами зависимость давления в вакуумной камере экструдера от ее основных параметров.

Объекты и методы исследований

Принцип работы вакуумной камеры модернизированного экструдера 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.

При установившемся (стационарном) режиме и малых изменениях плотности водяного пара необходимая скорость воздушного потока, м/с, в вакуумной камере экструдера определяется уравнением [9]:

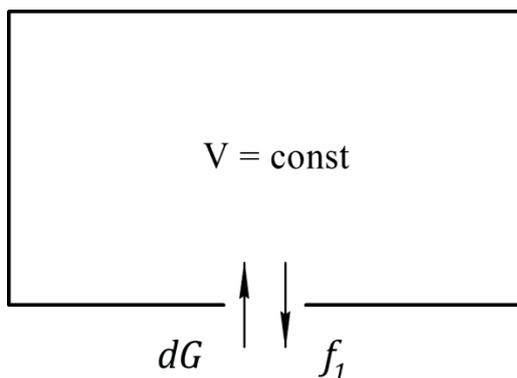


Рис. 2 - Расчётная схема вакуумной камеры экструдера:

dG – масса воздуха, откачиваемого из камеры за бесконечно малый промежуток времени, кг; f_1 – площадь отверстия, м²

$$u = w/S, \quad (1)$$

где w – скорость откачки паров из камеры, м³/с; S – площадь вакуумной камеры, м².

Длительность выхода вакуумной системы экструдера на стационарный режим работы

$$t_p = V/w, \quad (2)$$

где V – объем вакуумной камеры экструдера, м³.

Учитывая, что полученное по формуле (2) время по существу определяет период, за который происходит откачивание воздуха из вакуумной камеры экструдера, условие эффективного функционирования вакуумной системы в разрабатываемом экструдере можно записать как

$$t_p \ll T_n, \quad (3)$$

где T_n – время работы вакуумного насоса, с [9].

С другой стороны, при установившемся режиме работы вакуумной камеры скорость откачивания из нее воздуха определяется условием равновесия между количеством влаги, испаряемой с поверхности продукта (экструдата), и объемом водяных паров, отводимых из камеры вакуумным насосом.

В связи с этим для обоснования основных параметров вакуумной камеры экструдера необходимо знать законы изменения

в ней давления в зависимости от основных параметров рабочего процесса экструдера и самой камеры (давление в вакуумной системе, объем камеры, диаметр вакуумпровода).

Решение задач исследования связано с рассмотрением модели функционирования вакуумной камеры на «холостом» ходу (при отсутствии в камере экструдата) и во время термовакуумной обработки продукта в процессе его обезвоживания. Расчётная схема функционирования вакуумной камеры экструдера для первого случая представлена на рис. 2.

Для данной расчетной схемы примем, что объем вакуумной камеры экструдера постоянный, а соотношение давлений в камере и за ее пределами не превышает критического значения ($\frac{P_b}{P_a} = 0,578$) [10, 11], где P_b – рабочее давление воздуха в камере, Па; P_a – атмосферное давление, Па.

При откачивании воздуха из камеры объёмом V через отверстие с поперечным сечением f_1 , м², количество воздуха в ней будет уменьшаться. И, напротив, при впуске воздуха, его количество будет увеличиваться.

Результаты исследований

В соответствии с принятым допущением об адиабатическом характере исследуемого процесса, уравнение состояния воздуха описывается адиабатой Пуассона [12, 10]:

$$PV^k = const, \quad (4)$$

где P – давление в вакуумной камере, Па; V – объем вакуумной камеры экструдера, м³; k – показатель адиабаты.

Удельный объём воздуха, м³/кг, находящийся в вакуумной камере экструдера,

$$\vartheta = \frac{V}{M} = \frac{V}{G} = \frac{g}{\gamma}, \quad (5)$$

где G – вес воздуха, находящегося в камере, (кг·м)/с²; M – масса воздуха, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; k – удельный вес воздуха, Н/м³.

С учетом уравнения (5) выражение (4) примет вид $P \frac{g^k}{\gamma^k} = const$ или

$$\frac{P}{\gamma^k} = const = c. \quad (6)$$

Вес воздуха, Н,

$$G = \gamma V.$$

Из уравнения (6) получим выражение для веса воздуха, находящегося в объеме V :

$$G = C^{-\frac{1}{k}} \cdot P^{\frac{1}{k}} \cdot V. \quad (7)$$

В дифференциальной форме это уравнение можно записать как

$$dG = \frac{1}{k} \cdot C^{-\frac{1}{k}} \cdot V \cdot P^{\frac{1}{k}-1} dP. \quad (8)$$

Для определения правой части уравнения (8) воспользуемся теорией Скроманиса А.А., предложенной им для расчета мембранного пульсатора доильного аппарата [11].

Уравнение состояния газа для вакуумной камеры экструдера имеет вид

$$PV = GRT, \quad (9)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура воздуха в вакуумной камере, К.

При уменьшении давления воздуха на бесконечно малую величину dP в камере также уменьшается вес воздуха и его температура. В дифференциальной форме состояние газа будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{V}{R} dP = T dG + G dT. \quad (10)$$

Вес воздуха, откачиваемого из камеры за бесконечно малый промежуток времени через отверстие площадью f_1 , можно выразить уравнением:

$$dG = -\gamma f_1 W dt, \quad (11)$$

где W – скорость истечения воздуха через отверстие за время dt , м/с; dt – временной промежуток, с.

При введении в формулу (11) площади f_1 следует принять, что площади поперечного сечения струи воздуха и поперечного сечения отверстия в вакуумной камере экструдера равны.

Скорость истечения воздуха W можно получить из уравнения Бернулли для идеального сжимаемого газа [11]:

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{P}{\gamma} + \frac{W^{*2}}{2g} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_B}{\gamma_B} + \frac{W^2}{2g}. \quad (12)$$

В рассматриваемом нами случае течение воздуха не является стационарным, однако в каждый бесконечно малый промежуток времени dt оно соответствует условиям уравнения Бернулли.

С учетом аналогичных расчетов в теории вакуумных систем доильных установок, можно считать, что скорость течения воздуха в отверстии вакуумной камеры экструдера W существенно выше скорости W^* в месте образования струи. Поэтому можно принять, $W^* = 0$, что дает возможность упростить уравнение Бернулли до вида:

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{P}{\gamma} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_B}{\gamma_B} + \frac{W^2}{2g} \quad (13)$$

и получить из этого выражения скорость течения воздуха в наиболее узком поперечном сечении струи:

$$W = \sqrt{\frac{2g \cdot K}{K-1}} \sqrt{\frac{P}{\gamma} - \frac{P_B}{\gamma_B}}. \quad (14)$$

Полученное значение W подставим в уравнение (11), дополнив его правую часть коэффициентом расхода μ . Данный коэффициент учитывает взаимодействие четырех коэффициентов:

- коэффициента скорости, характеризующего сопротивление отверстия истечению воздуха;
- коэффициента сжатия, характеризующего уменьшение поперечного сечения струи воздуха по сравнению с сечением отверстия;
- коэффициента, характеризующего полноту сжатия струи в зависимости от расположения отверстия в вакуумной камере;
- коэффициента, учитывающего форму сопла, отличную от теоретически принятого отверстия [13, 14, 11].

В первом приближении можно принять, что коэффициент расхода μ является постоянной величиной.

Учитывая, что $\frac{P_B}{\gamma_B} = C$ и, заменяя γ_B соответствующей ему величиной, окончательно получим:

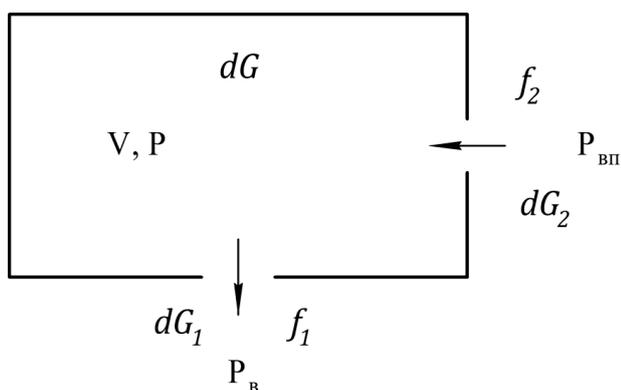


Рис. 3 – Расчётная схема вакуумной камеры экструдера при поступлении в нее экструдата (обозначения в тексте)

$$dG = -P_{\frac{1}{K}} \cdot f_1 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot K}{K-1} \cdot C^{-\frac{1}{K}}} \cdot \sqrt{P_{\frac{K-1}{K}} - P_{\frac{K-1}{K}}} dt \quad (15)$$

После введения обозначений:

$$\sqrt{\frac{2gK}{K-1} \cdot C^{-\frac{1}{K}}} = a;$$

$$\frac{K-1}{K} = m$$

и выполнения соответствующих подстановок получим дифференциальное уравнение с разделенными переменными:

$$\frac{dP}{P^m \cdot \sqrt{P^m - P_{\frac{1}{K}}^m}} = -\frac{P_{\frac{1}{K}} \cdot a \cdot f_1 \cdot \mu}{V \cdot (1-m)} dt \quad (16)$$

Знак минус в уравнении (16) показывает, что давление в вакуумной камере экструдера в процессе истечения воздуха уменьшается.

Аналитическое решение уравнения (16) в общем виде показывает, что время откачивания воздуха из вакуумной камеры экструдера является функцией трех переменных величин:

$$\tau = \varphi \left(V; \frac{1}{f_1}; P_{\frac{1}{K}} \right)$$

Время, с, за которое давление в камере достигнет величины давления в вакуумной системе экструдера:

$$\tau_1 = \frac{5}{8} \frac{V}{f_1 \cdot P_{\frac{1}{K}}^2 \cdot a \cdot \mu} \left[\frac{P_{\frac{1}{K}}^{\frac{m}{2}} \sqrt{P_{\frac{1}{K}}^m - P_{\frac{1}{K}}^m} \cdot (2P_{\frac{1}{K}}^m + 3P_{\frac{1}{K}}^m)}{P_{\frac{1}{K}}^{2m}} - \frac{3}{2} \ln \frac{P_{\frac{1}{K}}^{\frac{m}{2}} - \sqrt{P_{\frac{1}{K}}^m - P_{\frac{1}{K}}^m}}{P_{\frac{1}{K}}^{\frac{m}{2}} + \sqrt{P_{\frac{1}{K}}^m - P_{\frac{1}{K}}^m}} \right] \quad (17)$$

Следующим этапом теоретических исследований вакуумной камеры экструдера

является аналитический анализ процесса термовакuumного воздействия на экструдат при его обезвоживании. Будем считать, что обрабатываемое сырье содержит определенное количество воды. При выходе из фильеры матрицы экструдера часть воды превращается в водяной пар, который необходимо удалить из камеры. В принятой нами модели водяной пар при давлении $P_{\text{ВП}}$, Па; в количестве dG_2 поступает в вакуумную камеру экструдера через отверстие с площадью поперечного сечения f_2 (рис. 3).

Уравнение материального баланса имеет вид:

$$dG = dG_1 + dG_2 \quad (18)$$

где dG_1 – масса воздуха, откачиваемого из камеры за бесконечно малый промежуток времени, кг; dG_2 – масса воздуха, впускаемого в камеру за бесконечно малый промежуток времени, кг.

При этом

$$dG_1 = -P_{\frac{1}{K}} \cdot f_1 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P^m - P_{\frac{1}{K}}^m} dt; \quad (19)$$

$$dG_2 = P_{\frac{1}{K}} \cdot f_2 \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{P_{\text{ВП}}^m - P^m} dt. \quad (20)$$

Получим дифференциальное уравнение, описывающее изменение давления воздуха в вакуумной камере экструдера в режиме термовакuumного воздействия на выходящий из фильеры матрицы экструдат:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{f_1 \cdot a \cdot \mu \cdot P^m}{V \cdot (1-m)} \left[\frac{f_2}{f_1} \cdot P_{\frac{1}{K}} \cdot \sqrt{P_{\text{ВП}}^m - P^m} - P_{\frac{1}{K}} \cdot \sqrt{P^m - P_{\frac{1}{K}}^m} \right] \quad (21)$$

Уравнение (21) показывает, что давление в вакуумной камере экструдера в первую очередь зависит от следующих параметров:

- площадей поперечных сечений входного и выходного отверстий f_1 и f_2 соответственно;
- объема камеры V ;
- давления водяного пара, поступающего в вакуумную камеру вместе с экструдатом $P_{\text{ВП}}$;
- рабочего давления воздуха в вакуумной системе экструдера $P_{\frac{1}{K}}$.

В заключение следует отметить, что

зависимость $P = \varphi(\tau)$ можно получить численным решением дифференциального уравнения (21) методом Рунге-Кутты четвертого порядка, дающим достаточно высокую для практического применения точность решений [15].

Выводы

При постоянном объеме вакуумной камеры время выхода вакуумной системы экструдера на заданный режим работы зависит от объема камеры, рабочего давления в вакуумной системе и площади поперечного сечения вакуумпровода.

В режиме термовакуумного воздействия на экструдат давление в вакуумной камере экструдера зависит влажности обрабатываемого сырья и готового продукта, площади поперечного сечения вакуумпровода, объема камеры и давления в вакуумной системе экструдера.

Результаты выполненных нами теоретических исследований позволят в дальнейшем прогнозировать базовые показатели параметров вакуумной системы модернизированного экструдера и сравнивать их с результатами экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Воронина, П.К. Формирование качества пива в процессе сбраживания пивного сусла с использованием экструдата ячменя / П.К. Воронина, А.А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 100-103.
2. Курочкин, А.А. Использование экструдированного ячменя в пивоварении / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.В. Новиков // Пиво и напитки. – 2006. – № 5. – С. 16-17.
3. Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении / Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 4. – С. 79-83.
4. Белковый комплекс экструдированного ячменя / Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, В.П. Чистяков, В.В. Новиков // Пиво и напитки. – 2007. – №3. – С. 12.
5. Шабурова, Г.В. Повышение технологического потенциала несоложенных зернопродуктов / Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, П.К. Воронина // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – №1 (32). – С. 90-96.
6. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – №4. – С. 70-74.
7. Курочкин, А.А. Системный подход к разработке экструдера для термовакуумной обработки экструдата / А.А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 17-21.
8. Теоретическое обоснование термовакуумного 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.
9. Слезов, В.В. К теории термовакуумной сушки / В.В. Слезов, В.А. Кутовой, Л.И. Николаичук // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2003. – № 13. – С. 7-13.
10. Краснов, И.Н. Доильные аппараты / И.Н. Краснов. – Ростов: Ростовский университет, 1974. – 372 с.
11. Скраманис, А.А. Основы расчета доильных аппаратов и установок / А.А. Скраманис. - Елгава: ЛСХА., 1980. – 320 с.
12. Королев, В.Ф. Доильные машины, теория и расчеты / В.Ф. Королев. М.: Машиностроение, 1969. – 276 с.
13. Курочкин, Анатолий Алексеевич. Повышение эффективности подготовки нетелей к лактации за счет совершенствования процессов и средств механизации: автореф. дис. ... д-ра технических наук: 05.20.01 / А.А. Курочкин.- Санкт-Петербург, 1993. – 42 с.
14. Курочкин, Анатолий Алексеевич. Повышение эффективности подготовки нетелей к лактации за счет совершенствования процессов и средств механизации: дис. ... д-ра технических наук: 05.20.01 / А.А. Курочкин. – Сумы, 1993. – 321 с.
15. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. - М.: Наука, 1977. – 872 с.