

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА СЫРЬЯ В ЭКСТРУДЕРЕ 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, фильера, коэффициент, эффект, расход, термовакuumный, объемный.

Цель исследований – теоретическое обоснование влияния термовакuumного эффекта на объемный расход сырья в экструдере с вакуумной камерой. Теоретические исследования рабочего процесса одношнековых экструдеров позволили получить аналитические выражения, с помощью которых можно определить объемный расход экструдированного сырья серийной машиной. Для экструдеров, использующих в своей работе термовакuumный эффект, эта теория не позволяет получить приемлемых результатов, так как не учитывает тот факт, что техническое решение, реализованное в экспериментальном экструдере, по сравнению с серийной машиной позволяет увеличить коэффициент взрыва экструдата в 1,5...2 раза. В свою очередь, это существенно влияет на объемную производительность экструдера и не позволяет с необходимой точностью определить конструктивно-технологические параметры вакуумной камеры и её шлюзового затвора. В связи с этим, в выполненных исследованиях, на основе уравнения баланса массы обрабатываемого сырья, находящегося в тракте экструдера и его вакуумной камере, теоретически обоснован коэффициент, учитывающий влияние термовакuumного эффекта на объемный расход сырья в экспериментальном экструдере, а также установлена связь этого коэффициента с другими значимыми параметрами процесса экструзии. Полученные результаты могут быть полезны для последующих теоретических исследований экструдеров с термовакuumным принципом работы и позволяют рассчитать аналитическими методами основные параметры вакуумной камеры машин, осуществляющих термопластическую экструзию растительного сырья.

Современные представления о базовых принципах термопластической экструзии растительного сырья позволяют утверждать, что к наиболее важным функционально-технологическим свойствам получаемых экструдатов и продуктов из них можно отнести коэффициент взрыва (расширения), насыпную массу, набухаемость, растворимость, водо- и жирудерживающую способность, текстуру и усвояемость.

При этом большая часть перечисленных свойств экструдатов в той или иной степени связана с их пористостью, интенсивность формирования которой зависит от содержания влаги и крахмала в обрабатываемом сырье, а также перепада давления на входе в фильеру матрицы экструдера и на ее выходе [4, 5].

Анализ влияния среды с пониженным давлением (по отношению к атмосферному) на капиллярно-пористую структуру получаемых экструдатов показал, что одним из эффективных способов управления при формировании этой структуры является термовакuumное воздействие на экструдат в момент его выхода из фильеры машины.

В результате развития этого научного направления в Российской Федерации и ряде других стран за последние 15-20 лет были опубликованы несколько работ, связанных с получением экструдатов на основе термовакuumного эффекта, а также выданы патенты на способ получения экструдатов и технические средства для их реализации [6, 8, 10].

Прикладное значение этих разработок нашло отражение в технологиях получения хлебобулочных изделий, напитков, а также при обработке биологических отходов с целью получения корма для животных [1, 9].

Известно, что получение экструдатов из растительного сырья относится к чрезвычайно энергоемким технологическим процессам. При этом большая часть энергии затрачивается на повышение температуры обрабатываемого сырья.

Рабочий процесс экструдера, реализующего термовакуумный эффект, позволяет получить требуемый результат (коэффициент взрыва) при меньших давлении и температуре, что существенно экономит расход электроэнергии.

В связи с этим, можно предположить, что оценка влияния термовакуумного эффекта на объемный расход экструдата машиной, оборудованной вакуумной камерой, является актуальной задачей теоретических исследований.

Цель исследования – теоретическое обоснование влияния термовакуумного эффекта на объемный расход сырья в экструдере с вакуумной камерой.

Задачи исследования – получение теоретических зависимостей, позволяющих определить объемный расход сырья в экспериментальном экструдере с вакуумной камерой.

Материалы и методы исследований основаны на уравнении баланса массы обрабатываемого сырья, находящегося в тракте экспериментального экструдера и его вакуумной камере.

Результаты исследований. Основу рабочего процесса экструдера с вакуумной камерой составляют операции, характерные для серийной машины аналогичного назначения: перерабатываемое сырьё из загрузочного бункера с помощью дозатора направляется в рабочую зону экструдера и, захваченное шнеком, последовательно перемещается по внутреннему тракту машины, одновременно измельчаясь, нагреваясь и уплотняясь.

Отличительным признаком экспериментального экструдера является то, что при выходе из шнековой части машины обрабатываемый материал через отверстия в фильере матрицы поступает не в среду с атмосферным давлением, а в камеру с пониженным давлением (0,2...0,5 кПа).

Быстрый переход экструдата из области высокого давления (рабочий объем машины) в среду с пониженным давлением (вакуумная камера), в сравнении с серийным экструдером позволяет значительно увеличить интенсивность декомпрессионного взрыва, так как кипение воды, находящейся в продукте, осуществляется при меньшей температуре, чем это происходит при работе штатно укомплектованной машины. Таким образом, снижается расход электроэнергии, необходимой для нагрева сырья, а также обеспечивается более мягкий режим воздействия на термолабильные ингредиенты получаемого экструдата.

В общем случае объемный расход экструдата на выходе из фильеры матрицы экструдера в зависимости от давлений в тракте машины и за ее пределами можно определить на основании следующей зависимости [2]:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot R_{\phi}^4 \cdot (P_m - P_a) \cdot P_m \cdot Z_{\phi}}{8 \cdot \nu \cdot l_{\phi}}, \quad (1)$$

где R_{ϕ} – радиус фильеры, м;

P_m – давление, создаваемое экструдером перед матрицей, Па;

P_a – атмосферное давление, Па;

Z_{ϕ} – число фильер матрицы;

ν – кинематическая вязкость экструдата, Па·с;

l_{ϕ} – длина канала фильеры, м.

Расчеты, выполненные с помощью уравнения (1), показали, что для серийной машины объемный расход экструдата равен 0,0005641 м³/с, а для экспериментальной – 0,005775 м³/с, т.е. разница составляет меньше 1% [3].

Между тем, как показывают экспериментальные исследования экструдера с вакуумной камерой, такое техническое решение позволяет в сравнении с серийной машиной увеличить коэффициент взрыва как минимум в 1,5...2 раза, что, естественно отражается и на объемном расходе экструдата в такой машине.

В связи с этим для определения объемного расхода экструдата на выходе из фильеры матрицы экструдера с вакуумной камерой предложена уточненная формула [3]:

$$Q_{\varepsilon} = \frac{\pi \cdot R_{\phi}^4 \cdot (P_m - P_{\text{вк}}) \cdot P_m \cdot Z_{\phi}}{8 \cdot \nu \cdot l_{\phi}} \cdot k_{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вк}}$ – давление в вакуумной камере экструдера, Па;

k_{ε} – коэффициент, учитывающий увеличение диаметра экструдата по сравнению с диаметром фильеры (коэффициент взрыва).

Рассмотрим роль и физический смысл рекомендуемого коэффициента, для чего составим уравнение баланса массы экструдата, находящегося в тракте машины (до выхода из фильеры) и массы экструдата после выхода из фильеры:

$$M_t = M_f + M_w \quad (3)$$

или

$$V_t \cdot \rho_t = V_f \cdot \rho_f + V_w \cdot \rho_w, \quad (4)$$

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

V_w – объем водяного пара, образовавшегося в результате декомпрессионного взрыва экструдата в вакуумной камере машины, м³;

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

ρ_w – плотность водяного пара, кг/м³.

Принцип работы экспериментального экструдера заключается в том, что из его вакуумной камеры постоянно откачивается воздух (водяной пар) с тем, чтобы обеспечивать в ней необходимое пониженное (по отношению к атмосферному) давление. Поэтому массой водяного пара в данном случае можно пренебречь и переписать уравнения (3) и (4) в виде:

$$M_t = M_f \quad (5)$$

и

$$V_t \cdot \rho_t = V_f \cdot \rho_f. \quad (6)$$

Уравнение баланса объемов экструдата после выхода обрабатываемого сырья из фильеры и попадания его в вакуумную камеру экструдера можно записать и в таком виде:

$$V_f = V_t + \Delta V_t, \quad (7)$$

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

Подставим в формулу (7) значение объема экструдата после выхода из фильеры, полученного на основании уравнения (6), и после некоторых преобразований запишем:

$$\frac{\Delta V_t}{V_t} = \frac{\rho_t - \rho_f}{\rho_f}. \quad (8)$$

Обозначим $\frac{\Delta V_t}{V_t} = k_v$ – коэффициент, учитывающий увеличение объема экструдата при

выходе его из фильеры матрицы.

Тогда получим

$$\frac{\rho_t - \rho_f}{\rho_f} = k_v. \quad (9)$$

С учетом преобразований формулу (8) можно будет представить в виде

$$V_t = \Delta V_t \cdot \frac{1}{k_v}. \quad (10)$$

Умножая обе части уравнения (10) на ρ_t и учитывая выражение (5), получим:

$$M_f = \Delta V_t \cdot \frac{\rho_t}{k_v}. \quad (11)$$

Обозначим

$$\frac{\rho_t}{k_v} = \xi, \quad (12)$$

и тогда можно записать

$$M_f = \xi \cdot \Delta V_t. \quad (13)$$

Коэффициент, представленный формулой (12), назовем коэффициентом, учитывающим влияние термовакuumного эффекта на приращение объема экструдата после выхода его из фильеры экструдера.

После подстановки численных значений плотности экструдата до выхода и после выхода из фильеры экструдера (например, для пшеницы $\rho_f = 240 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_t = 800 \text{ кг/м}^3$) в уравнения (9) и (12), получим $k_v = 2,3$; $\xi = 348 \text{ кг/м}^3$.

Физический смысл коэффициента, учитывающего увеличение объема экструдата при выходе его из фильеры матрицы, достаточно хорошо характеризуется формулой (10), из которой следует, что приращение объема получаемого экструдата составляет для данного конкретного примера обрабатываемого сырья в количестве 230 % от его первоначального объема.

Коэффициент, учитывающий влияние термовакuumного эффекта на приращение объема экструдата после выхода его из фильеры экструдера (ξ), показывает изменение массы получаемого экструдата на единицу приращения его объема.

Зная массу полученного экструдата, можно легко определить дополнительный объем сырья, который получается в результате его обработки в экструдере с вакуумной камерой. При этом данный коэффициент весьма информативен при сравнительном анализе экструдатов, выработанных из сырья с различной плотностью. Например, при сравнении пшеницы и ячменя, для которого коэффициент ξ равен 200 кг/м^3 , можно сделать вывод о том, что при одинаковой массе полученного экструдата приращение объема готового продукта будет больше для сырья с меньшим значением коэффициента ξ , т.е. в данном примере – для ячменя в 1,74 раза ($348/200$).

Формула (13) может быть весьма полезна в том случае, когда необходимо определить объем вакуумной камеры экструдера при известной массе перерабатываемого сырья.

Заключение. Полученные теоретические зависимости учитывают влияние термовакuumного эффекта на объемный расход сырья в экструдере и позволяют определить аналитическими методами основные параметры вакуумной камеры машин, в которых осуществляется термопластическая экструзия растительного сырья.

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. Денисов, С. В. Определение пропускной способности зоны загрузки пресс-экструдера / С. В. Денисов, В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 12. – С. 73-76.
3. Денисов, А. О. О влиянии термовакuumного эффекта на производительность экструдера с вакуумной камерой / А. О. Денисов // Инновационная техника и технология. – 2017. – № 1. – С. 52-58.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Новиков, В. В. Определение объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера / В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова [и др.] // Вестник Алтайского ГАУ. – 2011. – №1 (75). – С. 91-94.
8. 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.
9. Пат. 2610805 Российская Федерация, МПК А23К40/25 (2016.01), А23К10/26 (2016.01), А23К10/37 (2016.01). Способ производства кормов / Воронина П. К., Курочкин А. А., Шабурова Г. В. [и др.]. – № 2015119627 ; заявл. 25.05.2015 ; опубл. 15.02.2017, Бюл. № 5. – 8 с.
10. Pat. 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 ; publ. 21.02.2006.