

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.769

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСТРУДАТА

А. А. Курочкин

В работе представлены систематизированные данные по теоретическому обоснованию разработки экструдера для обработки сельскохозяйственного сырья, позволяющего наряду с экструдированием осуществлять термовакуумную сушку полученного продукта.

Ключевые слова: пористая структура, крахмал, влажность, экструдат, фильера матрицы, индекс расширения, термовакуумная сушка.

Введение

В зависимости от цели получения экструдатов механизм воздействия на сельскохозяйственное сырье может быть различным.

Если вырабатываемые экструдаты предполагается использовать как готовый продукт с заданными показателями качества, то параметры экструзионного процесса должны обеспечивать максимальную сохранность полезных свойств сырья с одновременным направленным воздействием на факторы, формирующие качество данного продукта.

При получении из сырья экструдатов-полуфабрикатов требования к их качественным показателям, как и в первом случае, сохраняются. Одновременно с этим некоторые полуфабрикаты требуют таких режимов экструзионной обработки, при которых эффективному воздействию подвергаются только отдельные составляющие сырья, например, белки, полисахариды или пищевые волокна.

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что пористая структура экструдатов, получаемых из растительного крахмалсодержащего сырья, предопределяет такие их свойства как набухаемость, водо- и жиродерживающая способность, растворимость, коэффициент расширения и др., которые в свою очередь влияют на текстуру и усвояемость продуктов. Эти свойства экструдатов в определяющей степени зависят от содержания крахмала в сырье и степени его изменений в процессе экструзии.

В свою очередь в трансформации крахмала экструзией определяющую роль играет подводимая к обрабатываемому сырью термическая и механическая энергия. Общее количество, а также соотношение этих видов энергии влияет практически на все значимые показатели получаемого продукта, в том числе и на их нежелательные изменения. Например, повышенная доза термического воздей-

ствия на экструдированное сырье может привести к деструкции витаминов в биологических объектах, повышенной клейстеризации крахмала или денатурации белков в сырье растительного происхождения.

Что касается формирования пористой макроструктуры экструдатов, то на этот процесс определяющее влияние оказывает резкий сброс давления при выходе сырья из фильеры и «взрывное» испарение из него воды.

В связи с тем, что в вакууме вода испаряется при температуре, которая существенно ниже температуры парообразования при атмосферном давлении, необходимая интенсивность декомпрессионного воздействия на экструдированное сырье может быть обеспечена за счет замены атмосферного давления, действующего на экструдат при выходе его из фильеры, на пониженное давление (вакуум) [1-5].

Целью работы являлось обоснование конструктивно-технологической схемы экструдера для термовакуумной обработки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения.

Объекты и методы исследований

В экструдере, с помощью которого реализуется термовакуумное воздействие на обрабатываемое сырье, поставлена задача интенсификации экструзионного процесса путем частичной замены в нем термической составляющей на механическую.

Структурная схема функционирования экструдера с камерой для термовакуумной обработки получаемого экструдата приведена на рис. 1.

Анализ схемы показывает, что основными оценочными критериями работы экструдера являются обобщенные значения результирующих факторов дозирующего, прессующего и фильерного устройств (Y_1, Y_2, Y_3), которые ха-

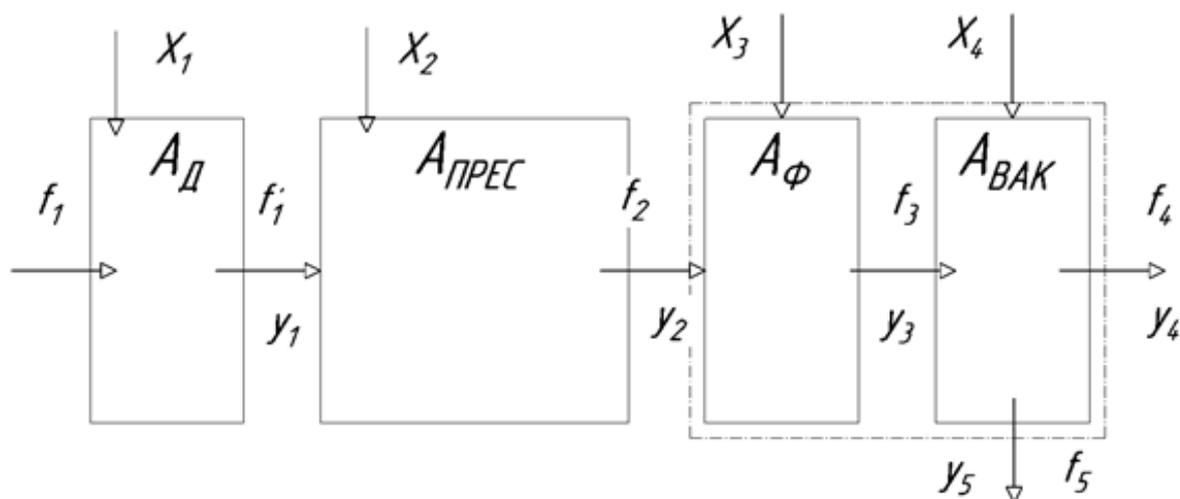


Рис. 1. Структурная схема функционирования экструдера:

A_D – дозирующее устройство экструдера, работающее в зоне загрузки; $A_{ПРЕС}$ – прессующее устройство экструдера, работающее в зоне прессования и гомогенизации; $A_Ф$ – фильтренное устройство экструдера, работающее в зоне дозирования; $A_{ВАК}$ – вакуумное устройство экструдера, работающее в зоне термовакуумной сушки; $f_1, f_1^*, f_2, f_3, f_4, f_5$ – обобщённые показатели, характеризующие сырье, поступающее в зоны загрузки, прессования и гомогенизации, дозирования, термовакуумной сушки, а также влажного воздуха и готового продукта на выходе из вакуумной камеры экструдера; X_1, X_2, X_3, X_4 – обобщенные значения внутренних факторов соответственно дозирующего, прессующего, фильтренного и вакуумного устройств экструдера; y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – обобщенные значения результирующих факторов дозирующего, прессующего, фильтренного и вакуумного (отвода влажного воздуха и готового продукта) устройств экструдера

рактически характеризуют производительность экструдера (объемный расход экструдата в зонах функционирования перечисленных устройств), а также факторы, влияющие на качество готового продукта

(y_4) и непрерывность рабочего процесса

модернизированного экструдера (y_5).

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, f_5).

На значения оценочных критериев оказывают влияние внутренние факторы, обусловленные внутренней структурой и параметрами дозирующего, прессующего, фильтренного и вакуумного устройств

экструдера – X_1, X_2, X_3, X_4 .

Конечной целью системного анализа является определение оптимальных, либо рациональных значений факторов X_1, X_2, X_3, X_4 с целью дове-

дения показателя y_4 до оптимального, а при невозможности – до рационального.

Многочисленные теоретические исследования и практический опыт эксплуатации одношнековых пресс-экструдеров показывают, что наилучшие результаты получаются при соблюдении следующего условия [6-8]:

$$Q_3 \geq Q_{пр} \geq Q_d, \quad (1)$$

где Q_3 – объемный расход экструдата в зоне загрузки;

$Q_{пр}$ – объемный расход экструдата в зоне прессования;

Q_d – объемный расход экструдата в зоне дозирования.

В этом случае работа пресс-экструдера протекает достаточно стабильно, а качество экструдата оказывается наилучшим.

Объемный расход экструдата в зоне загрузки пресс-экструдера может быть определен на основании зависимости [9]

$$Q_3 = \frac{(D - h)}{4} \cdot \omega \cdot \sin \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{h \cdot \rho \cdot \psi \cdot \cos \alpha \cos(\alpha + \phi)}{\cos \phi}, \quad (2)$$

где D – диаметр шнека, м;

h – глубина канавки шнека, м;
 ω – угловая скорость шнека, c^{-1} ;
 α – угол наклона винтовой линии шнека, град;

ρ – плотность материала, $кг/м^3$;

ψ – коэффициент заполнения межвиткового объема шнека;

ϕ – угол трения, $\phi = arctgf$.

Объемный расход экструдата в зоне прессования пресс-экструдера равен [10]:

$$Q_{np} = \frac{\pi^2 n R_1 \cdot (R_1 + R_2)(t - m)}{60} - \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{12} - \frac{\delta_{ш}^3 \cdot \pi^2 n R_1^2 \cdot 2\pi R_2}{12 \cdot 30 \cdot (R_2 - R_1)^2}, \quad (3)$$

где n – частота вращения шнека, c^{-1} ;

R_1 – радиус витка шнека, м (рис. 2);

R_2 – радиус корпуса экструдера, в котором расположен шнек, м;

t – шаг витка шнека, м;

m – средняя величина витка шнека, м.

$$m = \frac{a + b}{2};$$

$\delta_{ш}$ – высота щели канала между витком шнека и корпусом экструдера, м.

Формула (3) показывает, что объемный расход экструдата в зоне прессования одношнекового

пресс-экструдера зависит от параметров шнека, его рабочих режимов и физико-механических свойств обрабатываемого сырья.

Более детальный анализ приведенного выражения показывает, что производительность пресс-экструдера может быть увеличена за счет снижения интенсивности обратных потоков обрабатываемого сырья в зоне прессования, которые, в свою очередь, прямо пропорциональны разности давлений в начале и конце данной зоны.

Объемный расход экструдата в зоне дозирования ($м^3/с$) можно вычислить на основании выражения [11]:

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

где R_ϕ – радиус фильеры, м;

P_r – давление, создаваемое экструдером перед матрицей, Па;

P_a – атмосферное давление, Па;

Z_ϕ – число фильер матрицы;

l_ϕ – длина канала фильеры, м;

ν – кинематическая вязкость экструдата, Па·с;

V – средняя скорость истечения материала из фильеры, м/с.

Одной из особенностей экструзионной технологии является то, что обычно получаемый продукт имеет повышенную влажность и не храниться без дополнительного обезвоживания. Экструдер с вакуумной камерой позволяет отказаться от этой технологической операции за счет совмещения процесса получения экструдата с его термовакуумной сушкой.

Как известно, процесс сушки гетерогенных материалов состоит из нескольких этапов (периодов).

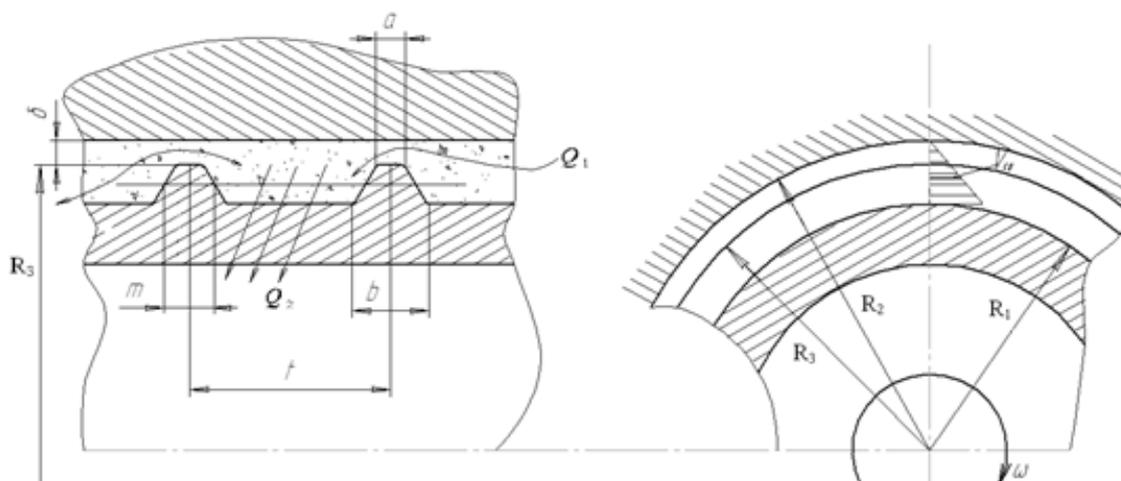


Рис. 2. Схема движения экструдата в зазоре между корпусом экструдера и шнеком

Первый из них характеризуется наиболее интенсивным изменением влагосодержания по времени обработки. В процессе этого этапа влага, испаряющаяся с поверхности высушиваемого материала, непрерывно заменяется новой, поступающей из внутренних слоев. Перемещение влаги внутри материала происходит по закону, описываемому в общем виде системой следующих уравнений [12, 13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \tau} &= K_{11} \nabla^2 U + K_{12} \nabla^2 T + K_{13} \nabla^2 P, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= K_{21} \nabla^2 U + K_{22} \nabla^2 T + K_{23} \nabla^2 P, \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{31} \nabla^2 U + K_{32} \nabla^2 T + K_{33} \nabla^2 P. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения (5) показывают, что интенсификация процесса сушки связана с ускорением процессов тепло- и массообмена в высушиваемом материале. Перемещение влаги из внутренних областей материала к его поверхности зависит от коэффициентов диффузии влаги, термодиффузии и молярного переноса – K_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$);

градиентов влажности, температуры и давления – $\nabla U, \nabla P, \nabla T$.

Обоснование оптимальных размеров вакуумной камеры, а также подбор вакуумного насоса при заданной его производительности, является весьма важной задачей.

Предположим, что при проектируемой производительности экструдера в вакуумной камере необходимо удалить некоторый объем водяных паров при соответствующей температуре. Объем этих паров зависит от содержания влаги в сырье и готовом экструдате.

Для условий установившегося (стационарно-го) режима и малых изменений плотности водяного пара необходимая скорость воздушного потока в вакуумной камере экструдера определяется уравнением [14].

$$V = \frac{\dot{\omega}}{S}, \quad (6)$$

где $\dot{\omega}$ – скорость откачки паров из камеры, см³/с;

S – площадь вакуумной камеры, см²;

Время выхода вакуумной системы экструдера на стационарный режим работы можно определить из выражения:

Список литературы

1. Курочкин, А. А. Регулирование функционально-технологических свойств экструдатов растительного сырья/А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, П. К. Воронина//Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 86–91.
2. Курочкин, А. А. Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового

$$t_p = \frac{\Omega}{\omega}, \quad (7)$$

где Ω – объем вакуумной камеры экструдера, см³.

Учитывая, что полученное по формуле (6) время, по существу определяет период заполнения вакуумной камеры, условие эффективного функционирования вакуумной системы в разрабатываемой конструктивно-технологической схеме экструдера можно записать как

$$t_p \ll T_H, \quad (8)$$

где T_H – время (интервал) работы вакуумного насоса [14].

Результаты и их обсуждение

Таким образом, скорость термовакuumной сушики определяется условием равновесия между количеством влаги, испаряемой с поверхности продукта и объемом водяных паров, отводимых от поверхности продукта посредством вакуумного насоса.

На основании приведенных в работе зависимостей и анализа результатов теоретических исследований термовакuumной сушики, можно сделать следующие выводы:

1. Принцип работы экструдера, при котором перерабатываемое сырье из области высокого давления в тракте машины (2,0-2,7 МПа) поступает в вакуумную камеру экструдера с давлением 0,02...0,09 МПа, позволяет значительно интенсифицировать процесс экструзии без увеличения его температурного режима.

2. Интенсификация процесса сушки полученных экструдатов связана с увеличением разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения и парциального давления в окружающей среде – ∇P . Иными словами, с понижением давления в вакуумной камере экструдера процесс удаления влаги из экструдата значительно ускоряется.

3. Интенсивность удаления влаги из частиц экструдата зависит от площади их поверхности и температурного режима экструзионного процесса.

4. Основной характеристикой рассматриваемого процесса является скорость сушки, которая определяется условием равновесия между количеством влаги, испаряемой с поверхности продукта и объемом водяных паров, отводимых от поверхности продукта посредством вакуумного насоса.

- сырья/А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина//Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 4. – С. 94–99.
3. Курочкин, А. А. Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения/А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина//Нива Поволжья. – 2014. – № 1. – С. 30–35.
 4. Курочкин, А. А. 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.
 5. Курочкин, А. А. Получение экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья с заданной пористостью//А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов//XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 06 (22). – С. 109–104.
 6. Курочкин, А. А. Теоретические и практические аспекты экструзионной технологии в пивоварении/А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, В. В. Новиков//Нива Поволжья. – 2007. – № 1. – С. 20–24.
 7. Курочкин, А. А. Обоснование рациональных параметров шнека пресс-экструдера в зоне загрузки/А. А. Курочкин, В. В. Новиков//XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 06 (10). – С. 123–127.
 8. 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. – № 06 (10). – С. 46–55.
 9. 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.
 10. Новиков, В. В. Определение объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера/В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Н. А. Харыбина, Д. Н. Азиаткин//Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1. – С. 91–94.
 11. Перов, А. А. Термодинамическая обработка комбикормов в экспантрудере/А. А. Перов//Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 9. – С. 9.
 12. Лыков, А. В. Теплообмен/А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 309 с.
 13. Кутовой, В. А. Системный подход к решению термовакuumных процессов сушки гетерогенных материалов/В. А. Кутовой//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 8 (66), Т. 6. – С. 40–44.
 14. Слезов, В. В. К теории термовакuumной сушки/В. В. Слезов, В. А. Кутовой, Л. И. Николайчук//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2003. – № 13. – С. 7–13.

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF THE EXTRUDER FOR THERMAL PROCESSING OF THE EXTRUDATE

A. A. Kurochkin

The paper presents a systematic data on the theoretical rationale for the development of the extruder for processing of agricultural raw materials, along with allowing the extrusion to perform thermal vacuum drying the obtained product.

Keywords: the porous structure, starch, moisture, extrudate extrusion, draw plate matrix, the index of expansion, thermal

References

1. Kurochkin, A.A. Regulating the structure of the extrudates herbal/A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina//Bulletin of the Samara State Academy of Agriculture. – 2013. – № 4. – P. 94–99.
2. Kurochkin, A.A. Regulation of functional and technological properties of the extrudates herbal/A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, P.K. Voronina//Bulletin of the Samara State Academy of Agriculture. – 2012. – № 4. – P. 86–91.
3. Kurochkin, A.A. Modeling of the process of obtaining extrudates based on the new technological solutions/A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina//Niva Volga region. – 2014. № 1. – P. 30–35.

4. Kurochkin, A.A. Extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids/A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, D. I. Frolov, P. K. Voronina//Bulletin of the Samara State Academy of Agriculture. – 2014. № 4. – P. 70–74.
5. Kurochkin, A. A. Obtain extrudates starch-containing grain feedstock with a given porosity/A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova, D. I. Frolov//XXI century: results and problems of this plus. – 2014. – № 06 (22). – P. 109–104.
6. Kurochkin, A.A. Theoretical and practical aspects of extrusion technology in brewing/A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, V. V. Novikov//Niva Volga region. – 2007. – № 1. – P. 20–24.
7. Kurochkin, A.A. Justification of rational parameters of the screw press of the extruder in the download area/A.A. Kurochkin, V. V. Novikov//XXI century: results and problems of this plus. – 2013. – № 06 (10). – P. 123–127.
8. Kurochkin, A. A. Methodological aspects of theoretical research press extruders for the processing of starch-containing vegetable raw materials/A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, V. V. Novikov, S. V. Denisov//XXI century: results and problems of this plus. – 2013. – № 06 (10). – P. 46–55.
9. Denisov, S.V. Determining bandwidth loading zone press extruder/S. V. Denisov, V. V. Novikov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova//Bulletin of the Altai state agrarian University. – 2009. – № 12. – P. 73–76.
10. Novikov, V.V. Determination of the volume flow rate of the extrudate to nip a single-screw extruder/V. V. Novikov, A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, N.A. Kharybina, D. N. Aziatkin//Bulletin of the Altai State Agrarian University. – 2011. – № 1. – P. 91–94.
11. Perov, A. A. Thermodynamic treatment of feed in the former pantrudere/A.A. Perov.//Mechanization and Electrification of Agriculture. – 2003. – № 9. – P. 9.
12. Lykov, A. V. Heat and Mass Transfer/A. V. Lykov. – M.: Energy, 1972. – 309 p.
13. Kutovojs, V.A. A systematic approach to solving the thermal vacuum drying processes of heterogeneous materials/V.A. Kutovojs//East European Journal of advanced technologies. – 2013. – № 8 (66), V.6. – P. 40–44.
14. Tears, V.V. On the theory of thermal vacuum drying/V. V. Tears, V.A. Kutovojs, L. I. Nikolaichuk//Problems of Atomic Science and Technology. Series: Vacuum, clean materials, superconductors. – 2003. – № 13. – P. 7–13