

# ТРИБУНА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

УДК 664.769

## ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ЭКСТРУЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н. В. Живаева, А. О. Денисов

В работе представлено обоснование актуального направления в научном обеспечении технологии получения экструдатов из сырья растительного происхождения.

*Ключевые слова:* экструзионная обработка, пористая структура, экструдат, охлаждение, барометрическое давление, вакуумная сушка.

### Введение

Технологический процесс получения экструдатов в общем случае включает в себя три стадии: подготовка сырья, его экструзионная обработка и обработка полученного экструдата. При этом в большей части исследований, посвященных экструзии продукции растительного происхождения, подготовка сырья крайне редко рассматривается в отрыве от основной операции данного процесса, а внимание к заключительной стадии не адекватно ее значимости для получения экструдатов требуемого качества [1, 2, 3, 4].

Известно, что пористая структура экструдатов предопределяет большинство их физических свойств: индекс расширения, набухаемость, водоудерживающую способность, растворимость, жироудерживающую способность [5, 6, 7].

В свою очередь пористость экструдатов в первую очередь определяется количеством содержащегося в обрабатываемом сырье крахмала и воды. Это объясняется тем, что именно интенсивное испарение влаги при выходе обрабатываемого сырья из фильеры матрицы экструдера вызывает ускоренный переход аморфного крахмального геля в стеклообразное состояние. Стенки образовавшихся пор при этом затвердевают, приобретают хрупкость, а готовый продукт приобретает те или свойства. Многочисленные работы доказывают, что эти свойства напрямую зависят от характера изменения (в данном случае снижения) температуры материала, находящегося в аморфном состоянии и стеклования крахмального клейстера [8, 9, 10, 11, 12].

Таким образом, характер охлаждения экструдата после выхода его из фильеры матрицы машины может рассматриваться в качестве одного из основных факторов, влияющих на формирование свойств получаемого продукта.

**Целью работы** являлось обоснование роли давления воздуха в постематричной зоне экструдера

и его влияния на интенсивность охлаждения экструдата.

### Объекты и методы исследований

Сущность получения экструдатов характеризуется следующими положениями. Исходный обрабатываемый материал, находящийся в сыпучем состоянии (цельное или измельченное зерно пшеницы, ржи, ячменя и др.), при естественной или повышенной влажности уплотняется в процессе перемещения по тракту пресс-экструдера, нагревается и переходит в состояние упругой вязко-пластической массы. При выходе из фильеры экструдера продукт взрывообразно расширяется и выводится за пределы машины. В дальнейшем полученный полуфабрикат или готовый продукт подвергается естественной или искусственной сушке с тем, чтобы сформировать нужные свойства и обеспечить условия для их сохранности на период гарантированного срока хранения.

Процесс сушки экструдатов подчиняется классическим положениям теории сушки и состоит из двух основных этапов, обычно называемых первым периодом, или периодом постоянной скорости, и вторым периодом, или периодом падающей скорости сушки [13, 14].

Первый период процесса сушки характеризуется линейным изменением влагосодержания обрабатываемого материала во времени и отражает тот факт, что влага, испаряющаяся с поверхности экструдата, непрерывно заменяется новой, поступающей из его внутренних слоев.

Температура поверхности экструдата в этот период примерно равна температуре его внутренних слоев и остается постоянной, а давление пара жидкости на поверхности оказывается равным давлению насыщения. Таким образом, процесс сушки экструдата в первом периоде эквивалентен испарению жидкости со свободной поверхности и определяется лишь внешними факторами, т.е. темпера-

турой, скоростью движения и влагосодержанием окружающего воздуха.

Упрощенно примем, что испарение влаги с поверхности экструдата аналогично ее испарению со свободной поверхности, подчиняется закону Дальтона и в аналитическом виде может быть представлено в виде уравнения

$$\frac{dm}{d\tau} = K \cdot S \frac{P_0 - P_n}{P_b}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса испарившейся жидкости;

$\tau$  – время;

$K$  – коэффициент, учитывающий гидродинамические условия на поверхности испарения;

$S$  – площадь поверхности испарения экструдата;

$P_0$  – давление насыщенного пара на поверхности экструдата (при температуре поверхности материала);

$P_n$  – парциальное давление в окружающей среде;

$P_b$  – барометрическое давление в окружающей среде.

Из уравнения (1) следует, что скорость испарения будет возрастать в случае увеличения коэффициента, учитывающего гидродинамические условия на поверхности испарения экструдата, площади его поверхности, разности давлений  $P_0$  и  $P_n$ , характеризующей дефицит влажности воздуха, вычисленный по температуре испаряющей поверхности, а также при уменьшении барометрического давления в окружающей среде. При этом влияние барометрического давления в окружающей среде обусловлено тем, что с его ростом затрудняется отрыв молекул воды от испаряющей поверхности.

По мере уменьшения влажности экструдата наступает момент, когда скорость перемещения влаги к его поверхности оказывается недостаточной, чтобы обеспечить прежнюю скорость испарения с поверхности, вследствие чего скорость сушки начинает падать. Влажность, после которой зависимость влагосодержания от времени (кривая сушки) становится нелинейной, отделяет первый период от второго и называется критической влажностью. Критическая влажность, даже для одного материала, величина непостоянная и зависит от режима сушки. Начиная с критической влажности, кривая сушки асимптотически приближается к равновесной, при которой убыль влаги прекращается.

Снижение скорости сушки при неизменных условиях испарения на поверхности материала объясняется перемещением зоны испарения с поверхности вглубь материала. При этом внутри тела влага продолжает перемещаться по капиллярам в виде жидкости до зоны испарения, а потом в виде пара, диффундирующего через сухие слои материала. Таким образом, во втором периоде скорость сушки

определяется скоростью перемещения жидкой и газообразной фаз внутри материала и зависит, главным образом, от условий внутри материала [13, 14].

В качестве важного вывода, следующего из этой части характеристики процесса сушки экструдата, можно считать, что условия перемещения жидкой и газообразной фаз внутри обрабатываемого продукта (условия для реализации второго периода сушки) напрямую зависят от первого периода рассматриваемого процесса, во время которого формируются все значимые параметры капиллярно-пористого слоя экструдата (объемная и поверхностная пористость, эффективный радиус, капилляров проницаемость и др.)

Перемещение влаги внутри экструдата происходит по закону, аналогичному закону теплопроводности, и общий поток влаги в нем может быть выражен равенством

$$\frac{dm}{d\tau} = a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U - a_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T - K_P \cdot \nabla P, \quad (2)$$

где  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги;

$\rho_0$  – плотность сухого тела;

$\nabla U$  – градиент влажности;

$a_m^T$  – коэффициент термодиффузии;

$\nabla T$  – градиент температуры;

$K_P$  – коэффициент молярного переноса под действием градиента давления;

$\nabla P$  – градиент давления.

Процесс сушки экструдата продолжается до тех пор, пока влажность материала не достигнет равновесного (при заданных условиях) значения, после чего он прекращается.

В настоящее время отсутствуют надежные экспериментальные данные о численных значениях коэффициентов термо- и теплопроводности многих видов сельскохозяйственного сырья, поэтому численное значение испаряемой влаги в процессе сушки экструдатов (особенно во втором периоде сушки) не может быть с достаточной точностью определено аналитическим путем. Вместе с тем ценность рассмотренных уравнений (1) и (2) заключается в том, что они позволяют качественно оценить влияние различных факторов на перенос влаги в экструдатах и правильно учесть их значимость для интенсификации процессов сушки.

### Результаты и их обсуждение

Из анализа приведенных зависимостей следует, что интенсификация процесса сушки экструдатов в общем случае связана с решением следующих вопросов:

1. Увеличение разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения и парциального давления пара в окружающей среде ( $P_0 - P_n$ ).

2. Снижение барометрического давления в окружающей среде ( $P_b$ ).

3. Увеличение площади поверхности испарения (S).

4. Увеличение коэффициента K, учитывая, что, в конечном счете, толщину пограничного диффузионного слоя.

Накопленные к настоящему времени теоретические и экспериментальные данные в области сушки различных по свойствам материалов позволяют утверждать, что из перечисленных выше способов интенсификации сушки для экструдатов наиболее приемлемым будет снижение барометрического давления в окружающей среде, т.е. вакуумная сушка.

Следует отметить общепризнанный факт: вакуумная сушка обладает существенным недостатком, который дискредитирует большую часть ее несомненных преимуществ. Данный недостаток обусловлен тем, что известные способы подвода тепла в вакууме являются или весьма дорогостоящими (ТВЧ- и СВЧ-энергия), или отличаются трудоемкостью процесса и неудовлетворительным качеством (контактные методы) [13, 14].

Между тем в последние годы опубликованы результаты исследований, свидетельствующие о том, что если вакуумной сушке подвергать экструдат сразу после его выхода из фильеры матрицы экструдера, то указанный недостаток этого способа сушки не только устраняется, но и превращается в преимущество. Аргументируется это тем, что экструдат при такой сушке не требует нагревания (при выходе из фильеры он, как правило, имеет температуру выше  $100^{\circ}\text{C}$ ), а требует интенсивного

охлаждения, что соответствует технологическому процессу получения данного полуфабриката или готового продукта [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

При этом резкое снижение давления при такой сушке приводит к возникновению дополнительной движущей силы – нерелаксируемому градиенту общего давления, в результате чего происходит бурное парообразование по всему объему высушиваемого материала, и формирующийся молярный поток выносит из материала вместе с паром и часть влаги в жидкой фазе. Таким образом, механизм сушки оказывается аналогичным механическому обезвоживанию посредством прессования или центрифугирования.

Регулируя величину барометрического давления, а значит и процесс парообразования, можно добиться и структурного видоизменения высушиваемого капиллярно-пористого тела, и частичного или полного его разрушения. В случае допустимости структурных видоизменений параметры сушки необходимо выбирать именно из таких соображений. При этом структурные изменения сводятся к укрупнению и приданию той или иной геометрической формы порам и капиллярам, присутствующим в объекте [22].

## Выводы

Анализ приведенных в работе уравнений, а также результаты выполненных и известных к этому времени работ, свидетельствуют о целесообразности использования принципов вакуумной сушки в технологии получения экструдатов с капиллярно-пористой структурой.

## Список литературы

1. Карпов, В. Г. Разработка новых видов крахмалопродуктов экструзионным способом: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.05 / Карпов Владимир Георгиевич. М., 2000. – 48 с.
2. Курочкин, А. А. Повышение технологического потенциала несоло-женных зернопродуктов / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, П. К. Воронина // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 1 (32). – С. 90–96.
3. 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.
4. 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.
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. 109–114.
6. Шабурова, Г. В. Белковый комплекс экструдированного ячменя / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, В. В. Новиков, В. П. Чистяков // Пиво и напитки. – 2007. – № 3. – С. 12–13.
7. Курочкин, А. А. Аминокислотный состав экструдированного ячменя / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова // Пиво и напитки. – 2008. – № 4. – С. 12.
8. Шабурова, Г. В. Экструдированный ячмень как компонент функциональных пищевых продуктов / Г. В. Шабурова, Е. В. Петросова, Т. В. Шленская, А. А. Курочкин // Пищевая промышленность. – 2012. – № 10. – С. 44–45.
9. 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.
10. Курочкин, А. А. Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 4. – С. 94–99.
  11. Шабурова, Г. В. Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении / Г. В. Шабурова, П. К. Воронина, А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Известия Самарской ГСХА. – 2014. – № 4. – С. 79–83.
  12. Шабурова, Г. В. Оптимизация состава зернопродуктов при получении пивного суслу с использованием экструдированного ячменя / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, П. К. Воронина, Д. И. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 06 (22) . – С. 103–109.
  13. Курдюмов, В. И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин. – Ульяновск: УГСХА им. П. А. Столыпина, 2013. – 290 с.
  14. Павлушин, А. А. Механико-технологическое обоснование и разработка энергосберегающих средств механизации тепловой обработки зерна: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Павлушин Андрей Александрович. Ульяновск, 2015. – 42 с.
  15. 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.
  16. 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. – № 30. – С. 70–76.
  17. 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.
  18. Курочкин, А. А. 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. 14–20.
  19. Курочкин, А. А. Системный подход к разработке экструдера для термовакуумной обработки экструдата / А. А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 17–21.
  20. Курочкин, А. А. Технология производства кормов на основе термо-вакуумной обработки отходов с/х производства / А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4 (01). С. 36–40.
  21. Фролов, Д. И. Теоретическое описание процесса взрывного испарения воды в экструдере с вакуумной камерой / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, П. К. Воронина // Инновационная техника и технология. – 2015. – № 1 (02). С. 29–34.
  22. Патент 2239137 Российская Федерация МПК F26B5/02, F26B7/00. Способ сушки капиллярно-пористых материалов / В. Н. Хмелев, А. Н. Заборовский, № 2003102919; заявл. 31.01.2003; опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30. – 8 с.

## RATIONALE CURRENT TRENDS IN THE IMPROVEMENT OF EXTRUSION TECHNOLOGIES

*N. V. Zhivaeva, A. O. Denisov*

The work presents a study of current trends in scientific support of technology for production of extrudates from raw materials of vegetable origin.

*Keywords: extrusion processing, porous structure, extrudate, cooling, barometric pressure, vacuum drying.*

### References

1. Karpov, V. G. Development of new types of starch products by extrusion: author. dis. ... doctor. tech. Sciences: 05.18.05 / Vladimir G. Karpov. M., 2000. – 48 p
2. Kurochkin, A. A. Improving the technological capacity of nasolo-jenih grain products / G. V. Shaburova, A. A. Kurochkin, P. K. Voronina // Technique and technology of food production. – 2014. – № 1 (32) . – S. 90–96.

3. Kurochkin, A.A. Theoretical and practical aspects of extrusion technology in brewing / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, V.V. Novikov // *Niva Povolzhya*. – 2007. – No. 1. – S. 20–24.
4. Kurochkin, A.A. Substantiation of rational parameters of the screw press-extruder in the loading zone / A.A. Kurochkin, V.V. Novikov // *XXI century: the past and challenges of the present plus*. – 2013. – № 06 (10). – P. 123–127.
5. Kurochkin, A. A. production of extrudates starchy grain material with a predetermined porosity / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *XXI century: the past and challenges of the present plus*. – 2014. – № 06 (22). – P. 109–114.
6. Shaburova, G.V. Protein complex extruded barley / G.V. Sha-burova, A.A. Kurochkin, V.V. Novikov, V.P. Chistyakov // *Beer and drinks*. – 2007. – No. 3. – Pp. 12–13.
7. Kurochkin, A. A. Amino acid composition of extruded barley / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova // *Beer and drinks*. – 2008. – No. 4. – S. 12.
8. Shaburova, G.V. Extruded barley as a component of functional foods / G.V. Shaburova, O. V. petrosova, T.V. Shlensky, A.A. Kurochkin // *Food industry*. – 2012. – No. 10. – Pp. 44–45.
9. Kurochkin, A.A. Regulation of functional and technological properties of extrudates of vegetable raw materials / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, P.K. Voronina // *proceedings of the Samara state agricultural Academy*. – 2012. – No. 4. – P. 86–91.
10. Kurochkin, A.A. Regulation of the structure of extrudates starchy grain raw materials / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // *proceedings of the Samara state agricultural Academy*. – 2013. – No. 4. – P. 94–99.
11. Shaburova, G. V. prospects of using extruded buckwheat in brewing and bread baking / G.V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // *proceedings of the Samara state agricultural Academy*. – 2014. – № 4. – P.79–83.
12. Shaburova, G. V. optimization of the grain products upon receipt of wort using extruded barley / G.V. Shaburova, A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, D.I. Frolov // *XXI century: the past and challenges of the present plus*. – 2014. – № 06 (22). – P. 103–109.
13. Kurdyumov, V.I. Heat treatment of grain in installations contact type: monograph / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlishin, and G.V. Karpenko, S.A. Sutyagin. – Ulyanovsk: UGSKHA them. P.A. Stolypin, 2013. – 290 C.
14. Pavlushin, A.A. Mechanical and technological substantiation and development of energy-saving mechanization heat treatment grain: author. dis. ... doctor. tech. Sciences: 05.20.01 / Pavlishin Andrei. Ulyanovsk, 2015. – 42 p.
15. Kurochkin, A.A. Methodological aspects of theoretical research press extruders for processing starchy vegetable raw materials / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, V.V. Novikov, S.V. Denisov // *XXI century: the past and challenges of the present plus*. – 2013. – № 06 (10). – P. 46–55.
16. Kurochkin, A.A. Modeling of the process of obtaining extrudates based on new technological solutions / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // *Niva Povolzhya*. – 2014. – No. 30. – P. 70–76.
17. 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 // *proceedings of the Samara state agricultural Academy*. – 2014. – No. 4. – S. 70–74.
18. Kurochkin, A.A. Theoretical justification for the thermal vacuum EF-reaction in the workflow of the upgraded extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // *proceedings of the Samara state agricultural Academy*. – 2015. – No. 3. – S. 14–20.
19. Kurochkin, A. A. a Systematic approach to the development of thermal vacuum extruder for processing of the extrudate / A.A. Kurochkin // *Innovative mashinery and technology*. – 2014. – No. 4. – S. 17–21.
20. Kurochkin, A. A. the Technology of production of feed based on the thermo-vacuum treatment of waste/ agricultural production/A. A. Kurochkin, D.I. Frolov // *Innovative mashinery and technology*. – 2014. – № 4 (01). P.36–40.
21. Frolov, D.I. Theoretical description of the process of explosive evaporation of water in the extruder with vacuum camera/ D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, P.K. Voronina // *Innovative mashinery and technology*. – 2015. – № 1 (02). P. 29–34.
22. Patent 2239137 Russian Federation IPC F26B5/02, F26B7/00. Method of drying of capillary-porous materials / V. N. Khmelev, A. N. Zaborowski, No. 2003102919; Appl. 31.01.2003; publ. 27.10.2004, bull. No. 30. – 8 S.