

Влияние технологических параметров на падение давления в матрице одношнекового экструдера

Фролов Д.И., Юсупов Р.Р.

Аннотация. Исследовано влияние условий работы экструдера (влажность сырья, температура матрицы, скорость шнека и массовый расход) на падение давления в матрице для влажного сырья. Для измерения перепада давления в матрице использовали лабораторный экструдер ЭК-40 и комбинацию щелевой матрицы/реометра. Падение давления уменьшалось с увеличением влажности, скорости вращения шнека и температуры матрицы и увеличивались с увеличением массового расхода. Установлено, что температура матрицы является наиболее значимым параметром, влияющим на падение давления в матрице.

Ключевые слова: экструзия, крахмал, падение давления, температура, влагосодержание, массовый расход, скорость шнека.

Для цитирования: Фролов Д.И., Юсупов Р.Р. Влияние технологических параметров на падение давления в матрице одношнекового экструдера // Инновационная техника и технология. 2020. № 3 (24). С. 37–41.

Influence of technological parameters on the pressure drop in the die of a single-screw extruder

Frolov D.I., Yusupov R.R.

Abstract. The influence of the operating conditions of the extruder (raw material moisture, die temperature, screw speed and mass flow rate) on the pressure drop in the die for wet raw materials was investigated. An EK-40 laboratory extruder and a slot die / rheometer combination were used to measure the pressure drop across the die. The pressure drop decreased with increasing humidity, screw speed, and die temperature, and increased with increasing mass flow. It was found that the temperature of the matrix is the most significant parameter affecting the pressure drop of the matrix.

Keywords: extrusion, starch, pressure drop, temperature, moisture content, mass flow rate, screw speed.

For citation: Frolov D.I., Yusupov R.R. Influence of technological parameters on the pressure drop in the die of a single-screw extruder. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.3 (24). pp. 37–41. (In Russ.).

Введение

Экструзионная варка готовых пищевых продуктов и пищевых ингредиентов, белковых и полисахаридных биополимеров и их смесей, является устоявшейся операцией в современной пищевой промышленности. Одношнековые и двухшнековые экструдеры используются в пищевой промышленности для производства различных продуктов. Снековые закуски, кондитерские изделия, хлеб, макаронные изделия некоторые из примеров традиционного использования экструдеров в пищевой промышленности. Двухшнековые экструдеры являются более сложными и дорогостоящими, чем

одношнековые экструдеры, но они обладают многими преимуществами. Эффективное транспортирование материала благодаря прямому транспортирующему механизму в двухшнековых экструдерах является основным преимуществом [1]. Они также устраняют или минимизируют потоки давления и утечки в силу направления вращения шнека, формы шнека, конфигурации шнека и взаимного расположения секций шнека.

Влажная экструзия (влажность корма >40%) была почти невозможна ранее. Однако последние разработки в области экструдеров, включая сложные конструкции стволов, шнеков и матриц, делают мокрую экструзию применимой [2, 4, 6]. Модифи-

Таблица 1 - Регрессионный анализ падения давления в матрице экструдера

Переменная	Коэффициент частичной детерминации R^2	Вклад в коэффициент детерминации (%)
Температура матрицы	0,547	57,75
Содержание влаги	0,217	22,94
Массовый расход	0,137	14,52
Скорость шнека	0,045	4,8

кация вкуса и улучшение текстуры стали возможны благодаря использованию экструдеров. Улучшенные функции смешивания и замеса экструдеров обеспечивают транспорт и теплообмен, необходимые для текстурирования. В различных исследованиях сообщалось о высокой влажности экструзии обезжиренной соевой и рисовой муки [3]. Экструдеры также можно рассматривать как биореакторы, где сочетание высокой влажности (более 50%), повышенной температуры и сдвига используется для содействия ферментативному расщеплению крахмала [5]. Экструзионно-сжиженный крахмал может быть использован для последующего производства сиропа (осахаривания) или ферментации, такой как производство этанола. Общая эффективность осахаривания была значительно повышена по сравнению с обычными ферментативными реакторами. В последнее время разрабатывается и имеет большие перспективы термовакуумная экструзия [7-11].

Целью работы являлась исследование влияния содержания влаги и температуры матрицы на падение давления в матрице экструдера.

Объекты и методы исследования

Для экспериментальных испытаний использовали рисовый крахмал, содержащий 6,5 % белка и 6% влаги. Крахмал смешивали с водой в лабораторном смесителе для достижения влажности 55, 60 и 65 % (г воды/г раствора). Смешанную суспензию в резервуаре непрерывно перемешивали, чтобы поддерживать равномерную концентрацию. Для перекачки суспензии в экструдер использовался насос.

Экструзионные испытания проводились с использованием реометра и одношнекового экструдера ЭК-40 [4]. Размеры щели составляли 1,47 мм в высоту и 20 мм в ширину. Исследовались температуры 80, 85, 90, 100 °С. Температура продукта вместе с отклонением от заданной температуры измерялась четырьмя термодатчиками вдоль корпуса экструдера. Три датчики давления были использованы для того чтобы измерить давление. Датчики давления были откалиброваны при каждой рабочей температуре для получения точных показаний. Для повышения точности были выбраны три различных диапазона давлений преобразователей: 3 500 кПа вблизи выхода матрицы, 6900 кПа в середине и 10000 кПа вблизи ствола экструдера. Датчики

давления располагались на расстоянии 4 см друг от друга.

Экструдер работал при каждом содержании влаги, температуре матрицы, скорости шнека и массовом расходе до тех пор, пока не было достигнуто установившееся состояние (показания давления матрицы). Параметры отклика экструдера и давление матрицы регистрировались.

Были использованы три различных скорости вращения шнека (170, 220 и 270 об/мин). Массовый расход варьировался от 3 до 7 кг/ч.

Результаты и их обсуждение

Пошаговый регрессионный анализ, проведенный в Statistica, был использован для определения вклада каждой переменной в вариацию падения давления в матрице. Коэффициент детерминации (R^2) модели падения давления в матрице экструдера не показал значительного улучшения после анализа условий взаимодействия факторов. Было обнаружено только незначительное влияние взаимодействия факторов на модель (около 1,5 %). Поэтому регрессионный анализ проводился с четырьмя основными переменными: температура матрицы, содержание влаги, массовый расход и скорость вращения шнека. Коэффициент детерминации R^2 для падения давления в головке составил 0,95.

Поэтапный регрессионный анализ данных основных переменных представлен в Таблице 1. Температура матрицы имеет наибольший вклад в коэффициент детерминации R^2 , модели падения давления в матрице – 57,75%. Другие переменные – содержание влаги, массовый расход и скорость шнека, вместе составляли только 42,25% от общего изменения R^2 .

Вязкость расплавленных полимеров обычно увеличивается при понижении температуры, это объясняет, почему давление в матрице повышается при понижении температуры. Суспензия рисового крахмала, используемая в этом исследовании, представляет собой неньютоновскую жидкость, и ее реологические свойства сильно зависят от температурных изменений. По мере увеличения температуры матрицы при постоянном содержании влаги, скорости вращения шнека и массовом расходе падение давления в матрице уменьшалось. Повышение температуры матрицы привело к уменьшению падения давления в матрице в результате уменьшения вязкости пищевого расплава в экструдере. На рис. 1 показано изменение падения давления в матрице при изменении температуры матрицы при постоянной скорости вращения шнека (220 об/мин), массовом расходе (5 кг/ч) и содержании влаги.

На падение давления в матрице существенно влияло содержание влаги в сырье. Увеличение содержания влаги в сырье вызывало снижение падения давления в матрице, когда температура, скорость шнека и массовый расход оставались постоянными. Падение давления в матрице составляло 705 кПа,

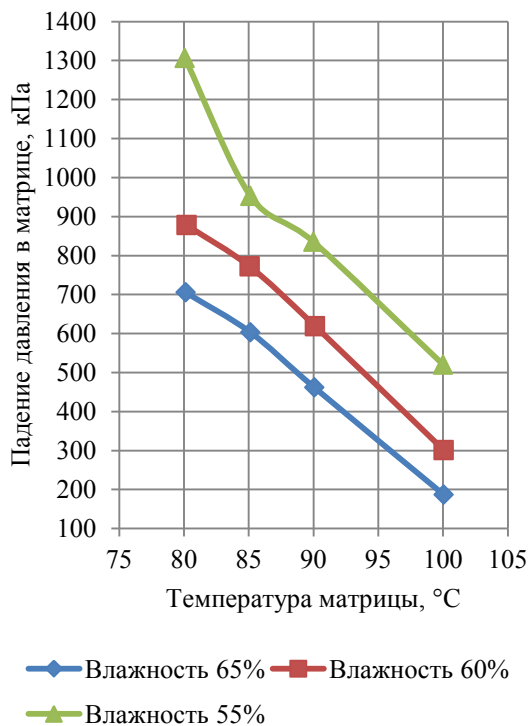


Рис. 1. Влияние температуры матрицы и содержания влаги на падение давления в матрице (220 об/мин, скорость шнека; 5 кг/ч, массовый расход)

877 кПа и 1306 кПа при 65%, 60% и 55% влажности сырья соответственно (температура матрицы 80 °C, скорость вращения шнека 220 об/мин и массовый расход 5 кг/ч). Вязкость расплава в экструдере и матрице ниже из-за наличия меньшего количества полимеров в системе с высоким содержанием влаги. Как правило, чем выше содержание влаги в сырье, тем меньше перепад давления вдоль матрицы экструдера из-за эффекта разбавления.

Увеличение массового расхода при сохранении постоянных остальных параметров процесса увеличивало степень заполнения цилиндра экструдера. Удельная загрузка экструдера, которая является мерой степени заполнения цилиндра экструдера, определяемая как отношение массового расхода к скорости шнека, увеличилась в результате увеличения массового расхода при постоянной скорости вращения шнека. Производительность экструдера также была увеличена за счет увеличения массового расхода. Следовательно, наблюдалось увеличение падения давления в матрице вместе с увеличением массового расхода, когда все другие переменные оставались постоянными. На рис. 2 показано изменение перепада давления в матрице экструдера в зависимости от массового расхода при трех различных скоростях вращения шнека, когда содержание влаги и температура матрицы были постоянными и составляли 60% и 80 °C соответственно.

Производительность экструдера не зависит от скорости вращения шнека в установившемся режиме. Однако степень заполнения и удельная загрузка в цилиндре экструдера уменьшается по мере увеличения скорости шнека, поскольку пропускная способность

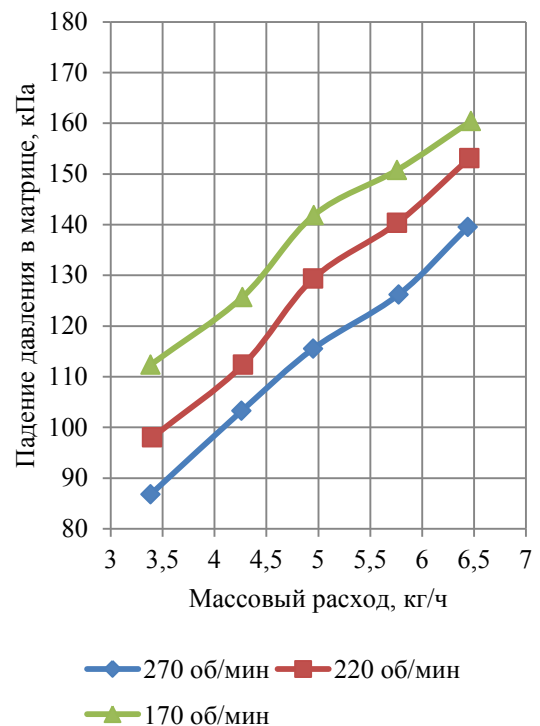


Рис. 2. Влияние массового расхода и скорости вращения шнека на падение давления в матрице (80 °C, температура матрицы; влажность 60%)

прямо пропорционально увеличивается. Падение давления уменьшается с увеличением скорости вращения шнека. На рис. 2 показано изменение падения давления в матрице при постоянном содержании влаги, температуре матрицы и различных массовых расходах в зависимости от скорости вращения шнека.

Увеличение скорости вращения шнека также привело к снижению вязкости расплава. Кажущаяся вязкость пищевого расплава в экструдере определяется как отношение напряжения сдвига стенки (Па) к скорости сдвига стенки (c^{-1}).

По мере увеличения скорости шнека скорость сдвига в экструдере будет увеличиваться. Увеличение скорости сдвига вызывает уменьшение вязкости. Следовательно, менее вязкий материал вызывает уменьшение падения давления в головке.

Выводы

Пошаговый регрессионный анализ показал, что температура матрицы существенно влияет на падение давления в матрице экструдера. Содержание влаги в сырье, массовый расход и скорость вращения шнека в порядке убывания также влияли на падение давления. Падение давления в матрице уменьшалось с увеличением влажности, скорости вращения шнека и температуры и увеличивались с увеличением массового расхода.

На основе исследования может быть разработана математическая модель для прогнозирования изменений вязкости экструзионной системы с высоким содержанием влаги.

Список литературы

- [1] Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Karnachi, N., Kelly, A., Vera-Sorroche, J., Coates, P., Brown, E. & Fei, M. (2014). Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. *Applied Energy*, 113, 1775-1785.
- [2] Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // *Volga Region Farmland*. 2019. № 2 (2). P. 87–94.
- [3] Li, W., Chen, S., Peng, J., Pan, L., & Tu, K. (2020). Effects of twin-screw extrusion processing variables on physicochemical properties and antioxidant activity of rice incorporated with *Agriophyllum squarrosum* flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14524. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14524>
- [4] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [5] 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.
- [6] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // *Нива Поволжья*. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [7] Потопов М.А., Фролов Д.И., Курочкин А.А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. Т. 5. № 4. С. 42–48.
- [8] 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.
- [9] Технологические аспекты регулирования выхода экстракта при получении пивного сусле / П.К. Гарькина, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2020. Т. 8. № 2. С. 13–20.
- [10] Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов и пищевых волокон / А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // *Техника и технология пищевых производств*. 2016. № 3 (42). С. 104–111.
- [11] Рациональные технологические параметры при производстве поликомпонентного композита на основе семян льна / В.М. Зимняков, О.Н. Кухарев, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // *Нива Поволжья*. 2017. № 4 (45). С. 157–163.

References

- [1] Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Karnachi, N., Kelly, A., Vera-Sorroche, J., Coates, P., Brown, E. & Fei, M. (2014). Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. *Applied Energy* 113, 1775-1785.
- [2] Frolov, D. I., Kurochkin, A. A., Garkina, P. K., Zimnyakov, V. M., & Kukharev, O. N. (2019). Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder. *Volga Region Farmland*, 2 (2), 87–94. <https://doi.org/10.26177/VRF.2019.2.2.020>
- [3] Li, W., Chen, S., Peng, J., Pan, L., & Tu, K. (2020). Effects of twin-screw extrusion processing variables on physicochemical properties and antioxidant activity of rice incorporated with *Agriophyllum squarrosum* flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44 (7), e14524. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14524>
- [4] Kurochkin, A.A., Frolov, D.I., & Voronina, P.K. (2015). Determination of the main parameters of the vacuum chamber of the modernized extruder. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 4 (32), 172–177.
- [5] Kurochkin, A.A., Shaburova, G.V., Frolov, D.I., & Voronina, P.K. (2014). Simulation of the extrudate production process based on a new technological solution. *Niva Povolzhya*, 30, 70–76.
- [6] Frolov, D.I., Kurochkin, A.A., Garkina, P.K., Zimnyakov, V.M., & Kukharev, O.N. (2019). Improving the efficiency of extrudate dewatering in the vacuum chamber of the modernized extruder. *Niva Povolzhya*, 2 (51), 134-143.
- [7] Potapov, M.A., Frolov, D.I., & Kurochkin, A.A. (2020). Optimization of the number of holes in the die of a single screw extruder for processing poultry manure. *Izvestia of the Samara State Agricultural Academy*, 5 (4), 42–48.
- [8] Kurochkin, A.A., Shaburova, G.V., Frolov, D.I., & Voronina, P.K. (2015). Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of the modernized extruder. *Izvestia of the Samara State Agricultural Academy*, 3, 15–20.
- [9] Garkina, P.K., Kurochkin, A.A., Shaburova, G.V., & Frolov, D.I. (2020). Technological aspects of the regulation of the extract yield when obtaining beer wort. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 8 (2), 13–20. <https://doi.org/10.14529/food200202>

- [10] Kurochkin, A.A., Voronina, P.K., Shaburova, G.V., & Frolov, D.I. (2016). Extrudates from plant materials with a high content of lipids and dietary fiber. *Technique and technology of food production*, 3 (42), 104–111.
- [11] Zimnyakov, V.M., Kukharev, O.N., Kurochkin, A.A., & Frolov, D.I. (2017). Rational technological parameters in the production of a multicomponent composite based on flax seeds. *Niva Povolzhya*, 4 (45), 157-163.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Юсупов Руслан Рушанович студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: E-mail: yusupown7@gmail.ru</p>	<p>Yusupov Ruslan Rushanovich student of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: E-mail: yusupown7@gmail.ru</p>