

УДК 664.769

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭКСТРУДАТОВ КРАХМАЛСОДЕРЖАЩЕГО ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ

Курочкин Анатолий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет».

440061, г. Пенза, ул. Герцена, д. 44, кв. 105.

E-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Шабурова Галина Васильевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет».

440061, г. Пенза, ул. Герцена, д. 44, кв. 105.

E-mail: Shaburovs@mail.ru

Фролов Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет».

440007, г. Пенза, ул. Антонова, д. 7.

E-mail: surr@bk.ru

Воронина Полина Константиновна, аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет».

440061, г. Пенза, ул. Герцена, д. 44, кв. 105.

E-mail: worolina89@mail.ru

Ключевые слова: экструдат, растительное сырье, крахмал, вакуум.

Цель исследований – выявить и оценить степень влияния технологических факторов экструзионного процесса и технических параметров экструдера на структуру экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья. Экспериментальные исследования выполнялись с помощью одношнекового пресс-экструдера, дополнительно оснащенного вакуумной камерой и шлюзовым затвором. В качестве объекта исследования были выбраны зерна ячменя, овса, проса и гречихи с массовой долей влаги 12-18% без предварительного шелушения поверхности. Экструзионная обработка перечисленных зерновых культур в экструдере без вакуумной камеры показала одну и ту же закономерность: в условиях быстрого перехода обрабатываемого материала из области высоких давлений (в тракте машины) в условия атмосферного давления, влажность экструдата по сравнению с влажностью сырья в исследуемом интервале снижается на 21,0-31,9%. При этом максимальное снижение (31,9 %) отмечалось в эксперименте с овсом, а минимальное (21 %) – при переработке гречихи. Переход экструдированного продукта из области высокого давления (2,0-2,7 МПа) в вакуумную камеру с давлением 0,02-0,09 МПа позволяет значительно интенсифицировать процесс удаления воды из обрабатываемого сырья. Зависимость индекса расширения экструдатов от влажности обрабатываемого зерна, давления воздуха в вакуумной камере экструдера и диаметра отверстия его фильеры получена путем реализации 3-х факторного центрального композиционного плана. Статистическая обработка экспериментальных данных, выполненная с помощью корреляционно-регрессионного анализа в среде Microsoft Excel 2010 и Statistica 10, позволила получить математическую модель второго порядка, адекватно описывающую зависимость индекса расширения экструдатов (коэффициента взрыва) от исследуемых факторов. Анализ полученной модели свидетельствует о существенном влиянии на величину индекса расширения экструдатов давления воздуха в вакуумной камере экструдера. За счет изменения давления в вакуумной камере экструдера можно оказывать воздействие, как на влажность, так и на индекс расширения получаемых экструдатов, а также управлять интенсивностью формирования их пористой структуры.

Многочисленными исследованиями установлено, что в крахмалсодержащем зерновом сырье максимальная степень желатинизации и деструкции крахмала обеспечивается оптимальным значением удельной механической и тепловой энергии, полученной экструдированным материалом. Не в меньшей степени величина этой энергии также оказывает влияние и на изменения белков в обрабатываемом материале.

В пищевой экструзии для оценки интенсивности воздействия на перерабатываемое сырье принято использовать специфическое понятие – SME (specific mechanical energy), численное значение которого представляет собой удельную энергию поглощения или диссипации. Считается, что в общем виде она зависит от

производительности экструдера, угловой скорости шнеков (шнека) и их геометрии, размеров и конструкции структурирующей фильеры, температуры проведения процесса, влажности экструдруемого сырья, его химического и гранулометрического состава.

В свою очередь, поглощенная экструдруемым материалом механическая энергия сил сдвига и трения аккумулируется в виде тепловой энергии, количество которой существенно влияет на коэффициент вспучивания (индекс расширения) экструдата и его пористость [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8].

С другой стороны, пористая структура экструдатов предопределяет их физические свойства: индекс расширения, набухаемость, водоудерживающую способность, растворимость, жирудерживающую способность [5, 9, 10].

Известно, что одним из факторов, влияющих на процесс термопластической экструзии, является влажность сырья.

От содержания воды в экструдруемом сырье в значительной степени зависит температура перехода обрабатываемого материала в вязко-текучее состояние, а значит и степень его нагрева за счет сил диссипации (внутреннего трения материала и его трения о шнек и корпусные детали экструдера). Таким образом, изменяя вязкость системы, вода оказывает влияние на тепловой баланс экструдера, в котором теплота выделяется в результате трения при гомогенизации, пластификации, сдвиге и сжатии перемещаемого в процессе обработки материала.

Влажность сырья и связанные с ней реологические свойства обрабатываемого материала оказывает существенное влияние на давление в предматричной зоне экструдера, а значит и на интенсивность «декомпрессионного взрыва» экструдата при выходе из фильеры. Жидкость в данном случае играет роль летучего, перегретого компонента системы, который обеспечивает порообразование в ней при мгновенном сбросе давления, а также резкое охлаждение и отверждение (гелеобразование) получаемого продукта в процессе взрывного испарения воды.

С другой стороны, давление обрабатываемого сырья в предматричной зоне экструдера можно регулировать его подачей в зоне загрузки, частотой вращения рабочего шнека (шнеков), диаметром формирующего канала (фильеры) и по существу перечисленные параметры являются в определенной степени взаимозависимыми, что необходимо учитывать в экспериментальных исследованиях.

В ранее выполненной работе была показана возможность регулирования пористости экструдатов за счет пониженного давления воздуха на выходящий из фильеры экструдера материал [5].

Цель исследований – выявить и оценить степень влияния технологических факторов экструзионного процесса и технических параметров экструдера на структуру экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья.

Задача исследований – определить рациональные значения факторов, оказывающих наибольшее влияние на индекс расширения экструдатов и интенсивность формирования их пористой структуры.

Материалы и методы исследований. Исследования влияния технологических факторов экструзионного процесса и технических параметров экструдера на структуру экструдата проводились с помощью экспериментальной установки, в состав которой входил одношнековый пресс-экструдер, укомплектованный вакуумной камерой.

Пониженное давление в вакуумной камере создавалось с помощью вакуумного насоса с подачей $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, вакуум-регулятора и вакуум-баллона.

Вакуум-регулятор позволял поддерживать необходимое давление в вакуумной камере, а вакуум-баллон служил для сглаживания колебаний давления в вакуумной системе, а также сбора конденсата, образующегося в процессе охлаждения паровоздушной смеси, откачиваемой из вакуумной камеры.

Выгрузка готового экструдата без разгерметизации вакуумной камеры обеспечивалась с помощью шлюзового затвора.

В качестве объекта исследования были выбраны зерна ячменя, овса, проса и гречихи с массовой долей влаги 10-18% без предварительного шелушения поверхности.

Целые зерна экструдировали в течение 15-25 с при температуре 110-130°C с последующим воздействием на выходящее из фильеры матрицы экструдера сырье пониженным давлением, равным 0,02-0,09 МПа. Экструдат при выходе из фильеры матрицы разрезался с помощью режущего устройства на частицы размером 1,0-2,0 мм.

Эксперимент проводили в трехкратной повторности, а технические параметры экструдера обеспечивали мягкий режим горячей экструзии перечисленных выше зерновых материалов. Частота вращения шнека пресс-экструдера составляла $7,5 \text{ с}^{-1}$, диаметр формирующего канала матрицы (фильеры) – 4, 6 и 8 мм.

Целью первой серии экспериментов было получение уравнений, позволяющих оценить зависимость влажности получаемого экструдата от содержания в исходном сырье жидкости и давления в вакуумной камере.

Результаты исследований. После обработки экспериментальных данных были получены регрессионные зависимости влажности экструдата овса от давления в вакуумной камере экструдера в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} W_{10} &= 3,85 \cdot e^{6,67P} \\ W_{14} &= 4,33 \cdot e^{9,14P} \\ W_{18} &= 4,71 \cdot e^{9,51P} \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные уравнения справедливы для области давлений в вакуумной камере экструдера от 0,02 до 0,1 МПа и показывают (рис. 1), что при выходе из фильеры матрицы экструдат овса в результате практически мгновенного испарения части жидкости снижает свою влажность по сравнению с исходным сырьем на 23,2-31,9 % (для давления 0,1 МПа, т.е. примерно равному атмосферному).

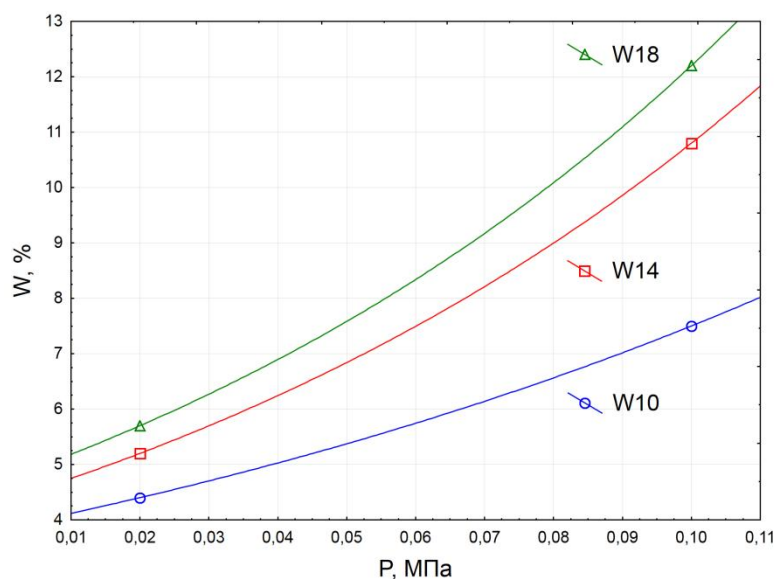


Рис. 1. График зависимости влажности экструдата овса от давления в вакуумной камере экструдера

Экструзионная обработка зерна ячменя, овса, проса и гречихи в экструдере без вакуумной камеры показала одну и ту же закономерность: в условиях быстрого перехода обрабатываемого материала из области высоких давлений (в тракте машины) в условия атмосферного давления, влажность экструдата по сравнению с влажностью сырья в исследуемых образцах (с содержанием воды соответственно 10, 14 и 18%) снижается на 31,9-21,0%. При этом максимальное снижение (31,9%) отмечалось в эксперименте с овсом, а минимальное (21%) – при переработке гречихи. На взгляд авторов, связано это в первую очередь с различными физико-механическими свойствами исследуемого зерна (размер, насыпная масса, плотность, упругость, плёнчатость).

Данная серия опытов показала, что переход экструдированного продукта из области высокого давления (2,0-2,7 МПа) в вакуумную камеру с давлением 0,02...0,09 МПа позволяет значительно интенсифицировать процесс удаления воды из обрабатываемого сырья.

Объясняется это тем, что экструдированное сырье в предматричной зоне с температурой 110...130°C и в условиях отсутствия кипения воды должно находиться под давлением не меньшим 1,5-2,7 МПа. В этом случае при попадании в вакуумную камеру жидкость, находящаяся в экструдате, будет кипеть при температуре 70-90°C. Такой температурный перепад будет способствовать более интенсивному снижению влаги в экструдате, чем при обработке сырья в экструдерах без вакуумной камеры.

Следующим этапом экспериментальных исследований являлась оценка влияния технологических факторов экструзионного процесса и технических параметров экструдера на индекс расширения экструдатов.

Для получения математической модели процесса получения экструдата в виде полинома второй степени был принят 3-х факторный центральный композиционный план (число опытов – 16, число кубических точек – 8, число звездных точек – 6, число центральных точек – 2).

Уровни варьирования факторов соответствовали: влажность обрабатываемого зерна (W) – 10; 14; 18%; давление воздуха в вакуумной камере экструдера (P) – 0,02; 0,04; 0,06 МПа и диаметр отверстия фильеры матрицы (d) – 4; 6; 8 мм. За критерий качества был принят индекс расширения экструдатов (B).

После реализации плана исследований статистическая обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью корреляционно-регрессионного анализа в среде Microsoft Excel 2010 и Statistica 10, в результате чего была получена математическая модель второго порядка, адекватно описывающая зависимость индекса расширения экструдатов (коэффициента взрыва) от исследуемых факторов

$$B = -0,9654 + 0,2823W - 0,0051W^2 + 0,2603d - 0,0291d^2 + 41,6415P - 247,1807P^2 \quad (2)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что на индекс расширения экструдатов наибольшее влияние оказывает давление воздуха в вакуумной камере экструдера. Качественные показатели полученной математической модели следующие:

- множественный коэффициент корреляции $R = 0,94$, что согласно шкалы Чеддока свидетельствует о весьма высокой силе связи между переменными;
- коэффициент детерминации $R^2 = 0,88$, свидетельствует о наличии достаточно тесной функциональной зависимости между изучаемыми факторами и критерием качества экструдатов. В полученной модели в 88% случаев изменения изучаемых факторов приводят к изменению индекса расширения экструдатов, а остальные 12% изменений связаны с факторами, не учитываемыми в модели;
- статистическая значимость составляет $p < 0,01$, что соответствует высокому уровню доверия к полученной модели.

Уравнение, описывающее поверхность отклика и характеризующее изменение индекса расширения экструдатов (коэффициента взрыва) (B) в зависимости от влажности обрабатываемого сырья (W) и давления в вакуумной камере экструдера (P) можно представить в следующем виде:

$$B = 0,6427 + 0,1621W + 19,7969P - 0,002W^2 + 0,8594WP - 124,5143P^2 \quad (3)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,83$.

Графическая интерпретация данного уравнения представлена на рисунке 2 (цифры показывают числовые значения коэффициента взрыва в отмеченных областях поверхности отклика).

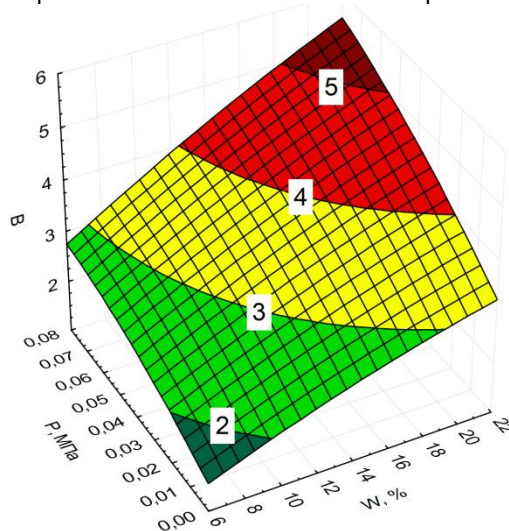


Рис. 2. Поверхность отклика, характеризующая зависимость коэффициента взрыва от влажности сырья и давления в вакуумной камере экструдера

Анализ уравнения (3) показывает, что с уменьшением давления в вакуумной камере экструдера (увеличением величины вакуума) коэффициент взрыва при прочих равных условиях достаточно заметно возрастает.

Уравнение, описывающее поверхность отклика и характеризующее изменение коэффициента взрыва экструдата в зависимости от диаметра фильеры и давления в вакуумной камере экструдера имеет вид

$$B = 1,8213 + 0,239d + 46,9925P - 0,0206d^2 - 2,0313dP - 161,7251P^2 \quad (4)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,71$.

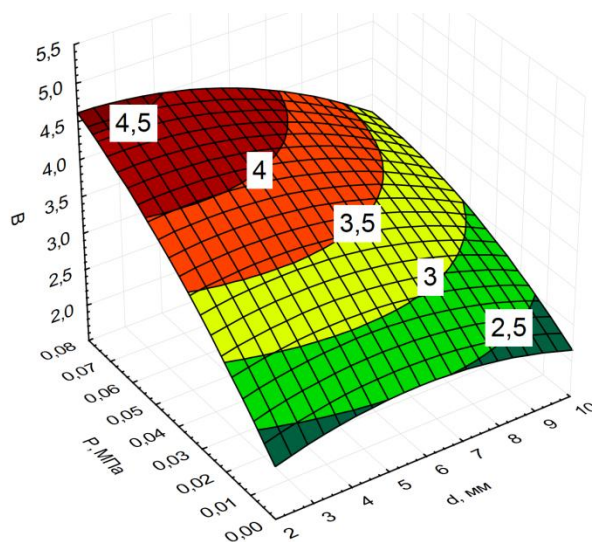


Рис. 3. Поверхность отклика, характеризующая зависимость коэффициента взрыва от диаметра фильеры и давления в вакуумной камере экструдера

Анализ уравнения (4) показывает, что в нем, так же, как и в уравнении (3) давление в вакуумной камере экструдера оказывает существенное влияние на величину коэффициента взрыва. Следует отметить и весьма заметный эффект от взаимодействия давления в вакуумной камере с диаметром фильеры матрицы экструдера.

Зависимость коэффициента взрыва экструдата от влажности обрабатываемого сырья и диаметра фильеры можно представить в виде уравнения (5), графическая интерпретация которого приведена на рисунке 4.

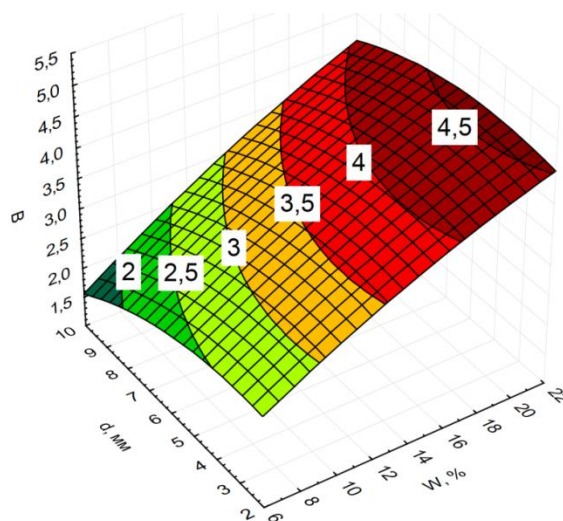


Рис. 4. Поверхность отклика, характеризующая зависимость коэффициента взрыва от влажности сырья и диаметра фильеры

$$B = 1,362 + 0,186W + 0,0807d - 0,0025W^2 + 0,0039Wd - 0,0187d^2 \quad (5)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,78$.

При изучении связи между переменными W , d и зависимой переменной B были определены частные коэффициенты корреляции. С их помощью определили, какая переменная оказывает на переменную выхода наибольшее влияние. Частный коэффициент корреляции между зависимой переменной B и независимой d равен $R_{Bd-W} = -0,28$, что свидетельствует об отрицательном влиянии на коэффициент взрыва. А частный коэффициент корреляции между зависимой переменной B и независимой W , равный $R_{BW-d} = 0,68$ позволяет утверждать, что в полученном уравнении зависимости (5) влажность экструдированного сырья оказывает более заметное влияние на коэффициент взрыва, чем диаметр фильеры d .

В заключительной части экспериментальных исследований были получены данные, характеризующие влияние давления в вакуумной камере экструдера на интенсивность формирования пористой

структуры экструдатов. С этой целью зерно ячменя влажностью 10, 14 и 18% подвергали экструзионной обработке при различном давлении воздуха в вакуумной камере экструдера и определяли пористость получаемых экструдатов. При этом частота вращения шнека пресс-экструдера составляла $7,5 \text{ с}^{-1}$, диаметр формирующего канала матрицы (фильеры) – 6 мм, диапазон изменения температуры – 110-130°C. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Пористость экструдата ячменя в зависимости от давления в вакуумной камере экструдера, %

| Влажность ячменя, % | Давление в вакуумной камере, МПа | | | | |
|---------------------|----------------------------------|------|------|------|------|
| | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,03 |
| 10 | 59,9 | 62,4 | 64,8 | 67,5 | 65,2 |
| 14 | 62,5 | 65,1 | 68,1 | 72,7 | 70,6 |
| 18 | 65,9 | 69,6 | 73,2 | 77,0 | 80,0 |

Заключение. За счет изменения давления в вакуумной камере экструдера можно оказывать воздействие, как на влажность, так и на индекс расширения получаемых экструдатов, а также управлять интенсивностью формирования их пористой структуры.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Курочкин, А. А. Аминокислотный состав экструдированного ячменя / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова // Пиво и напитки. – 2008. – №4. – С. 12.
5. 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.
6. 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. – №6 (10). – С. 123-127.
7. 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. 46-55.
8. 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 государственного аграрного университета. – 2011. – №1. – С. 91-94.
9. Остриков, А. Н. Влияние технологических параметров процесса экструзии на коэффициент вспучивания зерновых палочек / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин, А. С. Попов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2005. – №22. – С. 53-55.
10. 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.