

Оптимизация процесса обработки зернового сырья на шнековом пресс-экструдере

*В.Г. Коротков, д.т.н., профессор, В.П. Попов, к.т.н.,
С.Ю. Соловых, к.т.н., Е.В. Волошин, к.т.н.,
С.В. Антимонов, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ*

Одним из перспективных методов подготовки кормов к скармливанию является экструзия. В процессе экструзионной обработки на перерабатываемый материал оказывается одновременное воздействие давлением и температурой, в результате чего изменяется структура клетчатки корма, происходит декстринизация крахмала до глюкозы, стерилизация

корма, инактивация ингибиторов пищеварительного тракта, улучшаются вкусовые качества [1].

Современная тенденция развития экструзионных технологий заключается в обеспечении максимального снижения энергоёмкости процессов экструзии при одновременном улучшении качества экструдата [2].

При производстве экструдированных кормовых продуктов качественные показатели готовой продукции, а также энергоёмкость процесса экструзии зависят как от свойств перерабатываемого материа-

ла, так и от конструктивно-режимных параметров экструдера [3].

Целью исследования являлось выявление оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования зернового сырья, обеспечивающих снижение энергоёмкости и повышение качества готового кормового продукта.

Материал и методы исследования. Для определения оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования кормовых продуктов были проведены экспериментальные исследования, при которых в качестве исходных факторов (управляющих параметров) использовали: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру, частота вращения шнека и температура сырья на входе в экструдер [4].

В качестве параметров эффекта (управляемых и регулируемых параметров), взяты: комплексный показатель органолептических свойств экструдированного кормового продукта, комплексный показатель физико-химических свойств экструдированного кормового продукта; удельные затраты энергии на проведение процесса экструдирования [5].

К физико-химическим показателям для экструдированных кормовых продуктов относят влажность, крошимость и прочность. В органолептические показатели входят: внешний вид, цвет, аромат. Органолептические свойства экструдированного кормового продукта оценивались отобранной группой экспертов [6].

При проведении экспериментальных исследований в качестве исходного сырья использовали зерновую смесь, соответствующую требованиям ГОСТа 9268–2015 «Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота», в составе: пшеница – 10%, овёс – 19%, ячмень кормовой – 70%, соль поваренная – 1% [7].

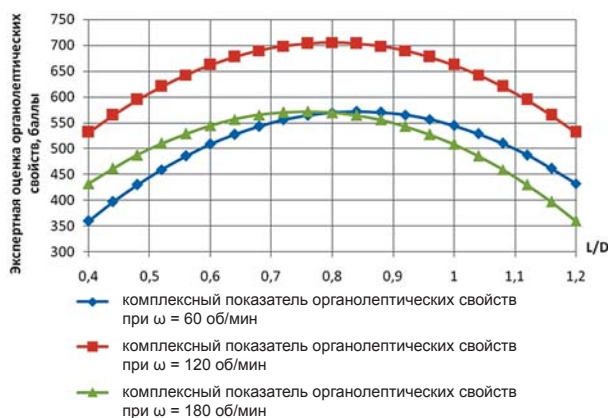


Рис. 1 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$

Результаты исследования. Были изучены зависимости комплексного показателя органолептических и физико-химических свойств и удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала. Графики зависимости комплексного показателя органолептических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 1 и 2.

При анализе зависимости, представленной на рисунке 1, видно, что комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D=0,8$, при дальнейшем увеличении значения L/D от 0,8 до 1,2 комплексный показатель органолептических свойств снижается. Наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 705,6$ балла достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин, отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D=0,8$ и при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$.

При анализе зависимости, представленной на рисунке 2, видно, что при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D=0,8$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается при увеличении частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 150$ об/мин, при дальнейшем увеличении значения ω от 150 об/мин до 180 об/мин комплексный показатель органолептических свойств снижается.

Анализ рисунка 2 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D=0,8$ наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 728,6$ балла достигает при частоте вращения шнека

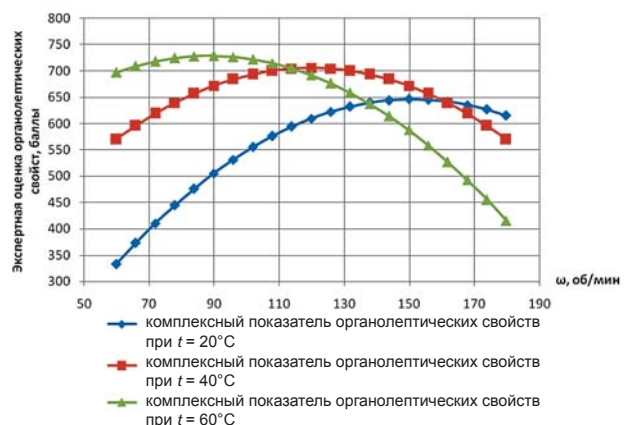


Рис. 2 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega$, об/мин ≤ 180), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 40^\circ\text{C}$, $t_3 = 60^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

$\omega = 90$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60^\circ\text{C}$.

Таким образом, анализ зависимости комплексного показателя органолептических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наибольшее значение $K_{\text{орг}} = 728,6$ балла достигает при частоте вращения шнека $\omega = 90$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Графики зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 3 и 4.

При анализе зависимости, представленной на рисунке 3, видно, что комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D = 0,8$, при дальнейшем увеличении значения L/D от 0,8 до 1,2 комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

Анализ рисунка 3 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$ наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\text{ф.-х.}} = 97,8$ балла достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

При анализе зависимости, представленной на рисунке 4, видно, что при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 145$ об/мин, при дальнейшем увеличении значения ω от 145 об/мин до 180 об/мин комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

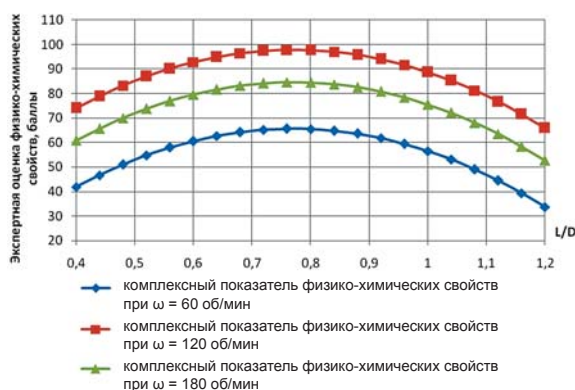


Рис. 3 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$

Анализ рисунка 4 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\text{ф.-х.}} = 98,7$ балла достигает при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40^\circ\text{C}$.

Таким образом, анализ зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наибольшее значение $K_{\text{ф.-х.}} = 98,7$ балла достигает при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Графики зависимости удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 5 и 6.

Анализ рисунка 5 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 27,6$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$.

При анализе зависимости, представленной на рисунке 6, видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин и $\omega_3 = 180$ об/мин с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20^\circ\text{C}$ до $t = 60^\circ\text{C}$ удельные затраты энергии возрастают.

Анализ рисунка 6 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 26,7$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^\circ\text{C}$.

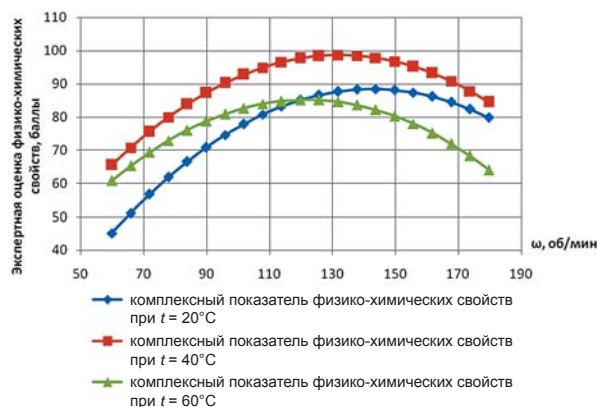


Рис. 4 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, \text{об/мин} \leq 180$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 40^\circ\text{C}$, $t_3 = 60^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

Таким образом, анализ зависимости удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наименьшее значение $УЭЗ=26,7$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

На основании представленных результатов однофакторных экспериментов сделан вывод, что органолептические и физико-химические свойства кормового продукта и энергоёмкость процесса экструзии достигают наилучших показателей при весьма различных параметрах технологического процесса и перерабатываемого материала. В связи с чем возникает необходимость провести графоаналитическую оптимизацию процесса экструзии зернового сырья с целью определения области оптимальных значений для получения высококачественных кормовых продуктов при минимальных затратах энергии.

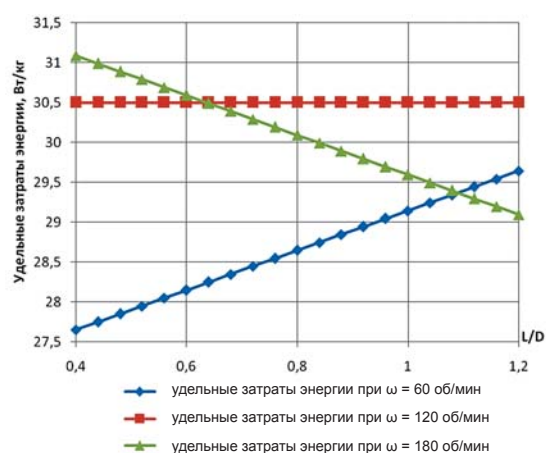


Рис. 5 – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$

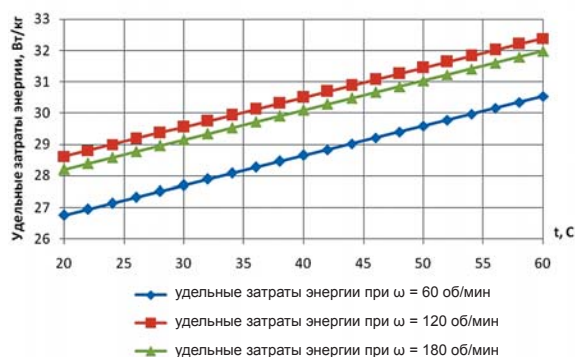


Рис. 6 – Зависимость удельных затрат энергии от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ\text{C} \leq 60$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

Для проведения оптимизации был составлен и реализован трёхфакторный эксперимент ПЭФ 2^3 , по результатам которого были получены уравнения регрессии зависимости комплексного показателя органолептических и физико-химических свойств экструдированного кормового продукта и удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру, частоты вращения шнека и температуры сырья на входе в экструдер и построены плоскости отклика. Оптимизацию параметров процесса экструдирования проводили путём наложения горизонтальных проекций плоскостей отклика. В результате было установлено, что наиболее оптимальной является область, ограниченная линиями: комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта – более 670 баллов, комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта – более 95 баллов и удельные затраты энергии $\leq 28,5$ Вт/кг. При этом отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру должно составлять от 0,77 до 0,81 м, частота вращения шнека – от 171 до 174 об/мин, при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^\circ\text{C}$ [8].

Выводы. Результаты исследования показали, что для снижения энергоёмкости процесса экструзии и повышения качества экструдированных кормовых продуктов оптимальными режимами экструдирования для производства кормовых продуктов из зернового сырья являются: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,77–0,81, частота вращения шнека – 171–174 об/мин и температура сырья на входе в экструдер $t = 20^\circ\text{C}$.

Литература

1. Тимофеева Д.В. Оптимизация процесса преобразования агрегатного состояния зернового сырья при экструзионной обработке / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов [и др.] // Хлебопродукты. 2013. № 8. С. 46–48.
2. Мартынова Д.В. Теоретическое обоснование энерго- и ресурсосберегающей конструкции шнекового пресс-экструдера для производства высококачественных кормовых продуктов / В.П. Попов, Д.В. Мартынова, С.В. Антимонов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68). С. 107–109.
3. Тимофеева Д.В. Исследование преобразования структурно-механических свойств и химического состава белково-крахмало-клетчатко-содержащего сырья в канале одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкилев, В.П. Попов [и др.] // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-методич. конф. (с междунар. участ.) / Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. С. 1007–1014.
4. Попов В.П. Технология получения экструдированных кормов с применением гречишной и подсолнечной лузги / В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013 г. № 4. С. 47–49.
5. Ханин В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья: дисс. ... канд. техн. наук. 05.20.01. Оренбург: ОГУ, 1999. 130 с.
6. Попов В.П. Получение оптимальных режимов при экструдировании белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья / В.П. Попов, Н.Н. Мартынов, Д.В. Мартынова [и др.] // Инновации и наукоёмкие технологии в образовании и экономике: матер. VI Междунар. науч.-практич. конф. Оренбург, 2017. С. 234–237.
7. Волошин Е.В. Совершенствование процесса измельчения зернового сырья при производстве комбикормов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2002. 153 с.
8. Мартынова Д.В. Оптимизация процесса экструдирования белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 3. С. 151–156.