

**И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков, Е.А. Тарасевич**  
*(УО «БГАТУ»,  
 г. Минск, Республика Беларусь)*  
**В.В. Чумаков**  
*(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
 по механизации сельского хозяйства»,  
 г. Минск, Республика Беларусь)*

## **МОДЕЛЬ ЭКСТРУДЕРА КОРМОВ**

### **Введение**

Повышение эффективности животноводства напрямую связано с развитием кормовой базы и является одним из факторов, обеспечивающих стабильную работу агропромышленного сектора.

Среди различных способов обработки сырья и изготовления комбикормов наиболее перспективным является метод экструзии, при котором сырье подвергается одномоментному воздействию высокой температуры, давления, влаги. Зерно обрабатывается в аппарате под давлением 40–60 атм. при температуре 130–160 °С, после чего из экструдера выбрасывается вспученное губчатое сырье в виде жгутиков или палочек (подобных кукурузным палочкам) диаметром 20–30 мм – происходит «взрыв» продукта в месте ударного разряжения на выходе из агрегата. При обработке в экструдере культур и зерноотходов доля работы «по перевариванию» осуществляется экструдером. Из этого следует, что энергетическая ценность корма переходит к животному в большем объеме. При данном процессе сложные белки и углеводы делятся на более простые формы, клетчатка – на вторичный сахар. Короткое время обработки зерна предотвращает коагуляцию белков, сохраняются витамины и полезные свойства, а бактерии, болезнетворные палочки и грибки умирают. Экструзионная обработка увеличивает перевариваемость белков, в результате разрушения в молекулах белка вторичных связей более доступными становятся аминокислоты. В экструдере происходит стерилизация корма и уничтожается вся патогенная микрофлора. В результате увеличивается продуктивность кормления животных и понижаются расходы на корма. При этом качество экструдированного продукта, энергетическая эффективность процесса определяются точностью поддержания режимов экструдирования в производственных условиях [1, 2, 3].

В химической промышленности накоплен значительный опыт экструдирования полимерного сырья, стабильные режимы которого определяют возможность использования простейших систем стабилизации параметров технологического процесса с использованием известных пропорционально-интегрально-дифференциальных законов (ПИД) управления [4, 5, 6]. Однако экструдирование растительного сырья является значительно более сложной задачей управления в силу нестабильности физико-механических свойств и необходимости варьирования рецептуры и состава зерносмеси [2].

### **Основная часть**

В общем случае [2, 6] энергетический баланс адиабатического экструдера определяется уравнением:

$$N = N_{\text{нагр}} + N_{\text{пер}} + N_{\text{пот}},$$

где  $N$  – мощность электродвигателя привода шнека, Вт;

$N_{\text{нагр}}$  – теплота, которая уходит с нагретым материалом, Вт;

$N_{\text{пер}}$  – мощность на перемещение продукта, Вт;

$N_{\text{пот}}$  – потери тепла в окружающую среду через кожух экструдера, Вт.

Тепловая мощность  $N_{\text{нагр}}$ , расходуемая на нагрев экструдированного материала, определяется выражением:

$$N_{\text{нагр}} = G_M \cdot c_M \cdot (\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{in}}), \quad (1)$$

где  $G_M$  – производительность экструдера, кг/с;

$c_M$  – удельная теплоемкость перерабатываемого материала, Дж/(кг·°С);

$\theta_{\text{out}}$  – температура материала на выходе из экструдера, °С;

$\theta_{\text{in}}$  – температура материала на входе в экструдер, °С.

Удельную теплоемкость экструдированного продукта рассчитаем как средневзвешенную величину, исходя из теплоемкости сухих веществ и влаги, содержащейся в зерне:

$$c_M = 0,01 \cdot [c_0 \cdot (100 - w) + c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot w], \quad (2)$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость сухих веществ зерна, Дж/(кг·°С);

$c_{\text{H}_2\text{O}}$  – удельная теплоемкость поглощенной зерном воды, Дж/(кг·°С);

$w$  – влажность зерна, %.

Значения удельной теплоемкости абсолютно сухих веществ зерна пшеницы колеблются в пределах 750–1760 Дж/(кг·°С), в среднем 1470 Дж/(кг·°С); риса – около 1200 Дж/(кг·°С); кукурузы – около 1100 Дж/(кг·°С). Удельную теплоемкость поглощенной зерном воды обычно принимают 4190 Дж/(кг·°С), то есть равной значению ее для свободной (жидкой) воды, что неверно. Теплоемкость связанной воды меньше этой величины и зависит от влажности и температуры. С увеличением температуры и влажности зерна удельная теплоемкость быстро возрастает, особенно в диапазоне свыше 40 °С. Чем выше влажность, тем значительнее рост удельной теплоемкости. Такое развитие обусловлено тем, что при повышении температуры более 20 °С энергия связи влаги в зерне заметно снижается, поэтому существенно возрастает ее теплоемкость. Таким образом, процесс экструдирования зерна является процессом с распределенными параметрами, что существенно затрудняет его математическое описание.

Поэтому в первом приближении [2] примем следующую зависимость теплоемкости зерносмеси от температуры  $\theta$  и влажности  $w$ :

$$c_M = a + b \cdot w + k \cdot (\theta - 20), \quad (3)$$

где  $a, b, k$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от состава смеси.

Для кукурузы можно принять  $a = 935$  Дж/(кг·°С);  $b = 51$  Дж/(кг·°С);  $k = 16,8$  Дж/кг.

В силу линейности модели (3), для расчетов примем усредненные значения температуры и влажности продукта:

$$\theta = \frac{(\theta_{\text{in}} + \theta_{\text{out}})}{2}. \quad (4)$$

Как показали экспериментальные исследования, экструдированный продукт в среднем имеет влажность на 4–6 % меньше влажности исходной зерносмеси. Тогда усредненная влажность

$$w = \frac{(w_{\text{in}} + w_{\text{out}})}{2}. \quad (5)$$

После подстановки (4) и (5) в (2) и в (1) получим:

$$c_M = (a - 20 \cdot k) + \frac{b}{2} \cdot (w_{\text{in}} + w_{\text{out}}) + \frac{k}{2} \cdot (\theta_{\text{in}} + \theta_{\text{out}}). \quad (6)$$

Из формул (1), (6) можно определить необходимые энергетические затраты на нагрев продукта при заданной температуре в зависимости от производительности, влажности и температуры исходного материала.

Затраты на перемещение определяются выражением:

$$N_{\text{пер}} = \frac{G_M \cdot P}{\rho},$$

где  $P$  – перепад давлений, Па;  
 $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>.

При этом величина перепада давления определяется выражением:

$$P = \frac{(S_1^2 - S_2^2)}{2 \cdot \rho \cdot S_1^2 \cdot S_2^2} \cdot G_M^2,$$

где  $S_1$  – площадь поперечного сечения канала экструдера, м<sup>2</sup>;  
 $S_2$  – площадь поперечного выходного отверстия экструдера, м<sup>2</sup>.

На основании модели (1)–(6) определена мощность на привод экструдера в зависимости от производительности и влажности зерна (таблица 1). Приведенные в таблице 1 значения мощности привода экструдера соответствуют статическому режиму его работы.

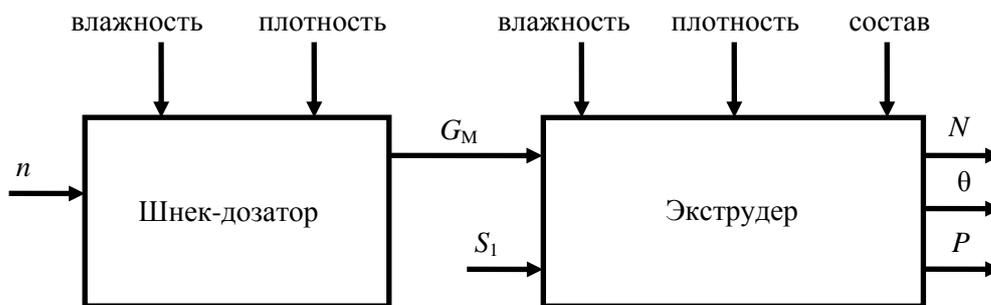
**Таблица 1.** – Зависимость мощности на привод экструдера ( $N$ , кВт) от производительности ( $G_M$ , кг/с) и влажности зерна ( $w$ , %)

		Производительность экструдера $G_M$ , кг/с										
		0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
Влажность зерна $w$ , %	10	66,0	69,3	72,6	75,9	79,2	82,5	85,8	89,1	92,4	95,7	99,0
	10,5	66,3	69,6	73,0	76,3	79,6	82,9	86,2	89,5	92,9	96,2	99,5
	11	66,7	70,0	73,3	76,7	80,0	83,3	86,7	90,0	93,3	96,7	100,0
	11,5	67,0	70,4	73,7	77,1	80,4	83,8	87,1	90,5	93,8	97,2	100,5
	12	67,4	70,7	74,1	77,5	80,8	84,2	87,6	90,9	94,3	97,7	101,0
	12,5	67,7	71,1	74,5	77,9	81,3	84,6	88,0	91,4	94,8	98,2	101,6
	13	68,1	71,5	74,9	78,3	81,7	85,1	88,5	91,9	95,3	98,7	102,1
	13,5	68,4	71,8	75,2	78,7	82,1	85,5	88,9	92,3	95,8	99,2	102,6
	14	68,7	72,2	75,6	79,1	82,5	85,9	89,4	92,8	96,2	99,7	103,1

В реальных производственных условиях работы колебания входных параметров, являющиеся возмущающими воздействиями, приведут к отклонению температуры продукта от заданной и, как следствие, к отклонению качественных показателей выходного продукта. Поэтому нужны управляющие воздействия, стабилизирующие температуру продукта.

В данном случае изменение мощности электродвигателя  $N(t)$  и производительности экструдера  $G_M(t)$  можно считать управляющими воздействиями на объект, а изменение начальной температуры материала  $\theta_{\text{in}}(t)$  и его удельной теплоемкости  $c_M(t)$  – возмущающими воздействиями.

Если представить экструдер в виде объекта управления с выходной величиной  $\theta_{\text{out}}$ , то в качестве возмущающих воздействий будут выступать температура, влажность и состав исходного сырья, а в качестве управляющих воздействий – изменение подачи исходного сырья в экструдер и изменение площади выходного отверстия (рисунок 1).



управляющие воздействия:  $n$  – частота вращения шнека-дозатора;

$S_1$  – площадь выходного отверстия;

контролируемые параметры:  $N$  – мощность на привод шнека экструдера;

$\theta$  – температура материала на выходе;

$P$  – давление на выходе;

возмущающие воздействия: влажность, плотность и состав зерносмеси

**Рисунок 1. – Блок-схема воздействия управляющих и возмущающих факторов на процесс экструдирования зерносмесей**

Особенностью управления режимом работы экструдера является зависимость коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $k$  из формулы (3) от параметров исходного сырья и задаваемого значения выходной температуры  $\theta_{out}$ . Поэтому даже если принять общий вид передаточных функций в виде последовательно соединенных звена чистого запаздывания и апериодического звена 1-го порядка:

$$W_{\theta,n}(p) = e^{-\tau_1 \cdot p} \cdot \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1};$$

$$W_{\theta,S_1}(p) = e^{-\tau_2 \cdot p} \cdot \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1},$$

где  $p$  – оператор Лапласа;

$\tau_1, \tau_2$  – время чистого запаздывания;

$K_1, K_2$  – статические коэффициенты передачи;

$T_1$  – постоянная времени по каналу частота вращения шнека экструдера – температура;

$T_2$  – постоянная времени по каналу площадь выходной фильеры экструдера – температура,

необходимо учитывать перекрестную зависимость коэффициентов от параметров исходного сырья и задания выходной температуры. При этом работа на максимальной мощности двигателя связана с риском его заклинивания. Поэтому решение эффективного управления нужно искать в классе робастных и интеллектуальных систем. Сложность разработки энергоэффективного алгоритма управления требует проведения многофакторных экспериментальных исследований для уточнения полученных аналитических зависимостей.

### Заключение

1. Особенностью растительного сырья как объекта экструдирования является нестабильность его физико-механических параметров, влияющих на качество получаемого продукта.
2. Незначительные изменения подачи (с 0,2 кг/с до 0,3 кг/с) и влажности зерна (с 10 % до 14 %) требуют значительного увеличения мощности на привод ствола экструдера (с 66 кВт до 103 кВт). Это говорит о необходимости высокой точности поддержания номинальных параметров работы экструдера для обеспечения энергоэффективности технологического процесса экструдирования.

3. Сложность разработки энергоэффективного алгоритма управления процессом экструдирования зерносмеси требует проведения многофакторных экспериментальных исследований для уточнения полученных аналитических зависимостей.

17.06.2016

### Литература

1. Дидык, Т.А. Повышение эффективности технологического процесса и обоснование параметров шнекового пресса для экструдирования зернового материала: диссертация кандидата технических наук: 05.20.01 / Т.А. Дидык. – Саратов, 2006. – 172 с.
2. Технологический регламент на производство экструдированного зерна / ФГБОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет, Министерство сельского хозяйства и продовольственной политики Красноярского края // ФГБОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет [Электронный ресурс]. – Красноярск, 2014. – Режим доступа: <http://www.kgau.ru/new/all/ui/iit/4.pdf>. – Дата доступа: 20.04.2016.
3. Кушнир, В.Г. Обоснование конструкционных параметров экструдера и определение качества экструдата / В.Г. Кушнир, Н.В. Гаврилов, А.С. Кушнир // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 2 – С. 7–10.
4. Хобин, В.А. Особенности процесса экструдирования биополимеров как объекта управления и задачи управления процессом / В.А. Хобин, В.Б. Егоров // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2012. – № 11–12. – С. 20–23.
5. Хобин, В.А. Экспериментальные исследования процесса экструдирования биополимеров и идентификация моделей его отдельных компонентов / В.А. Хобин, В.Б. Егоров // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2013. – № 13–14. – С. 9–15.
6. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келви. – М.: Химия, 1965. – 444 с.

УДК 631.31/356(633.49:635-153)

**В.В. Голдыбан, А.С. Воробей,  
И.А. Барановский**  
(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)

**УСТРОЙСТВО И РАБОТА САЖАЛКИ  
РЕВОЛЬВЕРНОГО ТИПА СГР-1 ДЛЯ  
ПОСАДКИ ОРИГИНАЛЬНЫХ СЕМЯН  
КАРТОФЕЛЯ И ТОПИНАМБУРА**

### Введение

Картофель и топинамбур возделывают на дерново-подзолистых, легкосреднесуглинистых, супесчаных, хорошо аэрированных, подстилаемых связанными почвообразующими породами почвах. Для картофеля и топинамбура для технических целей пригодны разные типы окультуренных почв.

Оптимальная плотность пахотного слоя для суглинков составляет 1,0–1,2 г/см<sup>3</sup>, для супесей – 1,3–1,5 г/см<sup>3</sup>, влажность почвы – в пределах 70–80 % НВ, скважность аэрации – 20–30 % от общего объема пор.

При размещении картофеля и топинамбура следует соблюдать пространственную изоляцию сортов с разной степенью устойчивости к фитофторозу и разного назначения (семенной и продовольственный) – не менее 100 м. Выполнение этого требования дает возможность предотвратить массовое перенесение возбудителя фитофтороза с ранних сортов на средне- и позднеспелые, которые отличаются повышенной устойчивостью к болезни.

На супесчаных почвах и легких суглинках посадка клубней картофеля и топинамбура осуществляется по предварительно нарезанным грядкам, на тяжелых и средних почвах – на хорошо обработанной ровной поверхности вертикально-фрезерными культиваторами с последующим образованием гряд.