

Автор: **Б. В. ЄГОРОВ**, доктор технічних наук, професор, чл.-кор. НААН України, заслужений діяч науки і техніки України, ректор Одеської національної академії харчових технологій

# Науково-практичні основи технологічних процесів екструдувannya та експандування зерна і комбікормів

Технологічні процеси теплової обробки зерна застосовують для підвищення його кормової цінності, а комбікормів – для підвищення кормової цінності і для підготовки комбікорму до подальшого гранулювання з метою зниження питомих витрат енергії, підвищення продуктивності преса-гранулятора і надання гранулам відповідної міцності. Відомо також, що застосування попередньої теплової обробки комбікорму підвищує вихід крупки, яку отримують шляхом подрібнення гранул.

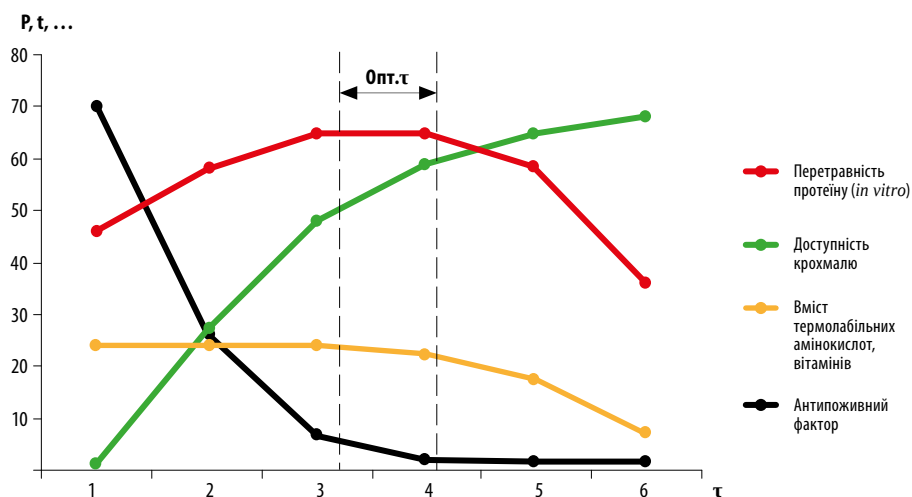
Підвищення кормової цінності зерна і комбікормів під час теплової обробки досягається шляхом підвищення доступності поживних речовин, руйнування антипоживних речовин, покращення смакових якостей та зниження загального мікробного числа, що покращує санітарну якість зерна і комбікормів.

Теплову обробку зерна доцільно застосовувати при виробництві комбікормів для молодняка сільськогосподарської птиці і тварин, травна система яких ще не здатна продукувати необхідну кількість ферментів, необхідних для розщеплення біополімерів поживних речовин [1,2,3]. Використання термічно обробленого зерна у складі комбікормів забезпечує:

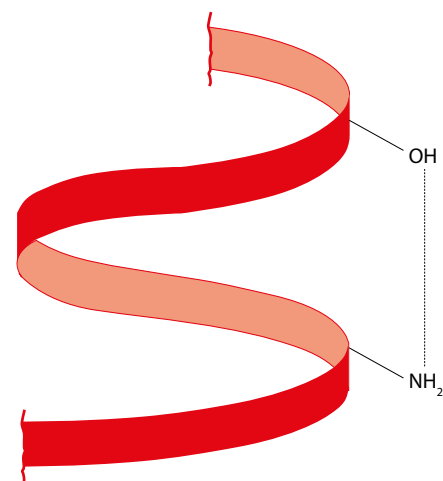
- **для курчат** – підвищення середньодобових приростів маси на 5–10% і зниження питомих витрат комбікормів на 5–7%;
- **для поросят** – підвищення середньодобових приростів маси на 10–15% і зниження питомих витрат комбікормів на 5–10%;
- **для телят** – підвищення середньодобових приростів маси на 5–10% і зниження питомих витрат комбікормів на 7–8%.

При виборі оптимальних режимів теплової обробки зерна і комбікормів слід пам'ятати про те, що більш жорсткі режими можуть привести до практично повного руйнування антипоживних речовин, максимального підвищення доступності крохмалю, проте і призвести до зниження перетравності таких поживних речовин, як протеїн, а також до втрати деяких біологічно активних речовин. Так, наприклад, при постійних значеннях тиску (P) і температури (t) оптимальна тривалість теплової обробки повинна забезпечити максимальний ефект при мінімальних втратах (див. **Рисунок 1**). Ефективність теплової обробки зерна або комбікормів визначається ступенем зниження вмісту антипоживних речовин, ступенем декстринізації крохмалю (для зерна злакових культур), перетравністю білка (*in vitro*), а також

**Рисунок 1.** Фактори впливу на вибір оптимальної тривалості технологічного процесу теплової обробки зерна і комбікормів



**Рисунок 2.** Приклад прояву реакції Майяра під час теплової обробки зерна

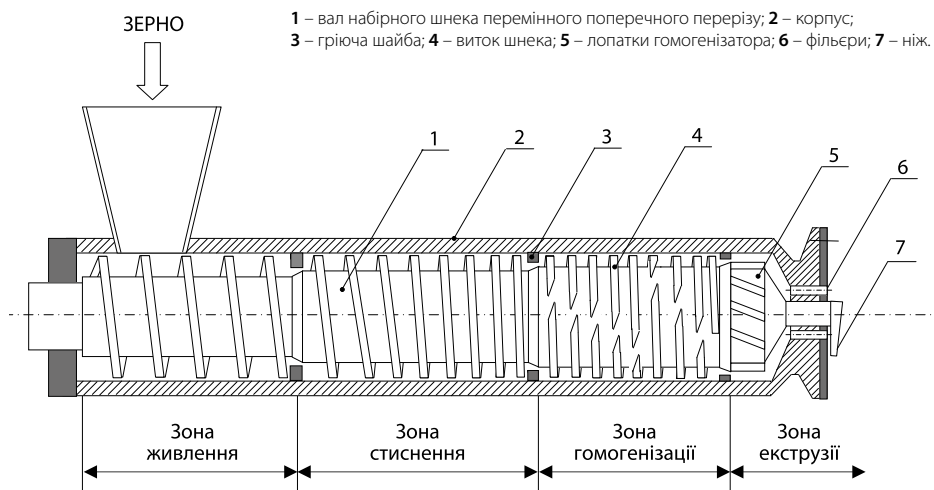


ступенем зниження вмісту однієї з найбільш термолабільних амінокислот або вітаміну.

Можливе зниження перетравності білка пов'язане з протіканням реакції Майяра (див. **Рисунок 2**), суть якої полягає у виникненні міцного ковалентного зв'язку між боковими амінними групами білків і боковими гідроксильними групами як самих білків, так і простих вуглеводів, що утворюють практично незасвоєвані ферментами комплекси.

Свідченням біохімічних перетворень є також зміна мікроструктури зерна в процесі теплової обробки. У більшості злакових культур крохмаль має вигляд щільно упакованих зернин (кристалічна форма), які часто покриті тонкою білковою плівкою. Це перешкоджає ферментам травної системи тварин здійснювати розщеплення біополімерів зерна. В процесі теплової обробки білки денатурують, звільняючи поверхню крохмальних зерен, останні набрякають за умови вмісту вологи і при певних режимах можуть руйнуватися, суттєво збільшуючи площу зовнішньої поверхні для ферментативного гідролізу. Саме тому більшість способів теплової обробки носить комбінований характер. Крім того, застосування попереднього зволоження або пропарювання зерна суттєво прискорює наступну теплову обробку. Цей факт було встановлено В.Н.Кириєвським і співавторами ще у 1982 році [4]. Виконаний ними аналіз механізму теплово-

### Рисунок 3. Схема одношнекового прес-екструдера



логоперенесення показав, що процеси теплової обробки зерна із застосуванням води пов'язані з переважанням дифузійного процесу перенесення вологи у вигляді рідини вглиб зернівки над розповсюдженням температурного поля, що цілком узгоджується з теорією теплово-логоперенесення А. В. Ликова. Тому на практиці використання води та водяної пари для попереднього зволоження зерна і комбікормів знайшло широке використання при здійсненні практично всіх способів теплової обробки.

Найбільш широко застосовують теплову обробку зерна екструдуювання,

особливо при виробництві комбікормів для молоді риби, для дорослої хижої риби, для домашніх тварин (собак і кішок), для хутрових звірів, а також при виробництві передстартових і стартових комбікормів для порослят і телят.

**Процес екструзії** (від лат. *extrusio* – виштовхування) полягає у продавлюванні пластичного матеріалу через отвори певного перерізу. Для того, щоб надати зерну або комбікормам пластичних властивостей, їх обробляють спеціальними способами, в основному звожуючи водою або водяною парою до вологості 18–28% в залежності від складу композиції. Однорідність екструдату досягається при об-

### Рисунок 4. Екструдер варильного типу

1 – горловина для завантаження комбікорму; 2 – паровий кондиціонер; 3 – форсунки для подачі водяної пари; 4 – корпус екструдера; 5 – система подачі водяної пари високого тиску; 6 – матриця; 7 – ніж у кожусі; 8 – привод; 9 – станина; 10 – пульт управління



робці сировини, попередньо подрібненої до розміру частинок в межах 1 мм.

Для обробки зерна застосовують одношнекові екструдери, для отримання комбікормів у вигляді екструдатів застосовують одно- або двошнекові варильні екструдери. Найбільшого поширення набули одношнекові екструдери (див. **Рисунок 3**).

В. А. Афанасьєв узагальнив основи теорії одношнекового екструдера, основною умовою стійкої роботи якого є дотримання умови нерозривності потоку [5]:

$$Q_{жс} = Q_{ш} = Q_{м}$$

де  $Q_{жс}$ ,  $Q_{ш}$ ,  $Q_{м}$  – продуктивність живильника, шнека і матриці.

Якщо  $Q_{жс} < Q_{ш} < Q_{м}$  гранули екструдату будуть погано формуватися, або не будуть формуватися взагалі. Якщо  $Q_{жс} > Q_{ш} > Q_{м}$  екструдер може заклинити. Рівняння для визначення  $Q_{жс}$ ,  $Q_{ш}$  і  $Q_{м}$  мають вигляд:

$$Q_{ш1} = \frac{\pi \cdot D_{ш}^2 \cdot n_{ш} \cdot h_{ш} \cdot \sin \varphi_{ш} \cdot \cos \varphi_{ш}}{2}$$

(для прямого потоку вздовж шнека)

$$Q_{ш2} = \frac{\pi \cdot D_{ш} \cdot h_{ш}^3 \cdot \sin^2 \varphi_{ш} \cdot P}{12 \mu \cdot L}$$

(для зворотного потоку вздовж шнека)

$$Q_{ш3} = \frac{\pi^2 \cdot D_{ш}^2 \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ш} \cdot P}{12 \mu \cdot b \cdot L}$$

$$Q_{м} = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \rho \cdot z}{128 \mu (e + 4d)}$$

(для зворотного потоку між шнеком і циліндричним корпусом),

де  $D_{жс}$  і  $D_{ш}$  – діаметри шнека живильника і шнека екструдера;

$n_{жс}$  і  $n_{ш}$  – частота обертання шнеків живильника і екструдера;

$h_{жс}$  і  $h_{ш}$  – глибина нарізання витків шнеків живильника і екструдера;

$\varphi_{жс}$  і  $\varphi_{ш}$  – кути підйому витків шнеків живильника і екструдера;

$\mu$  – густина суміші на вході в матрицю;

$\rho$  – густина гранул екструдату;

$L$  – довжина шнека екструдера;

$\delta$  – зазор між витками шнека і циліндричним корпусом екструдера;

$b$  – товщина виступу шнека екструдера;

$z$  – кількість отворів у матриці;

$d$  – діаметр отворів у матриці;

$e$  – довжина каналу отворів матриці;

$P$  – різниця тиску в зоні стискування і зоні завантаження.

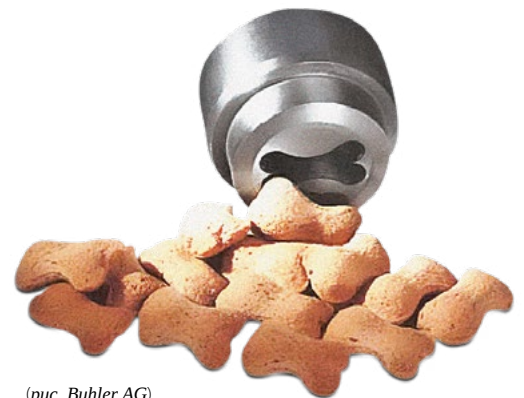
$$Q_{жс} = \frac{\pi^2 \cdot D_{н}^2 \cdot n_{н} \cdot h_{н} \cdot \sin \varphi_{н} \cdot \cos \varphi_{н}}{2},$$

$$Q_{ш} = \frac{\pi \cdot D_{ш}^2 \cdot n_{ш} \cdot h_{ш} \cdot \sin \varphi_{ш} \cdot \cos \varphi_{ш}}{2} - \frac{\pi \cdot D_{ш} \cdot h_{ш}^3 \cdot \sin^2 \varphi_{ш} \cdot P}{12 \mu \cdot L} - \frac{\pi^2 \cdot D_{ш}^2 \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ш} \cdot P}{12 \mu \cdot b \cdot L},$$

Наведені рівняння використовують при розрахунку параметрів екструдера для екструдування визначеної сировини. Безпосереднє використання наведених рівнянь для практичних розрахунків різноманітних сумішей проблематично, оскільки величини  $\mu$  і  $\rho$  залежать від великої кількості факторів, в першу чергу від хімічного складу і фізичних властивостей компонентів суміші, яка надходить в екструдер. Саме цими обставинами можна пояснити зміну режимів стійкої роботи екструдера при обробці сировини або сумішей компонентів різного складу.

За способами екструдування розрізняють звичайну і варильну екструзію. Звичайна екструзія полягає в обробці,

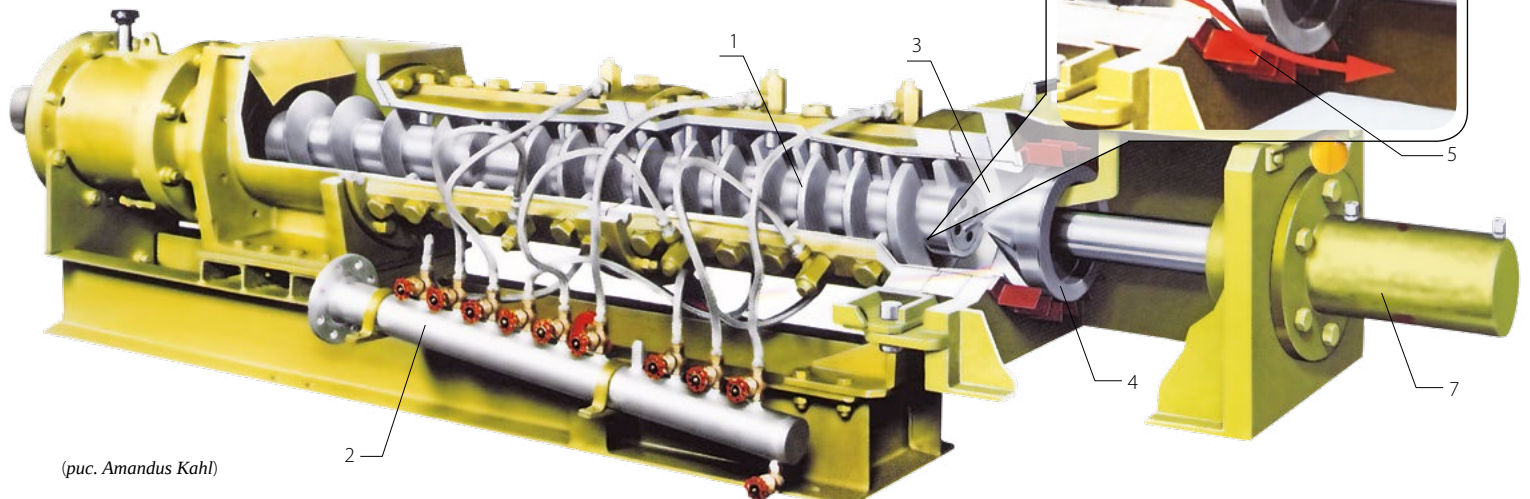
## Рисунок 5. Матриця варильного екструдера



(рис. Buhler AG)

## Рисунок 6. Конструктивні особливості експандера

1 – шнек змінного кроку; 2 – система подачі пари; 3 – щільова матриця кільцевого типу; 4 – робочий конус; 5 – пластини для розсікання; 6 – ніж; 7 – привід.



(рис. Amandus Kahl)

як правило, в одношнекових екструдерах зерна сухого або попередньо зволоженого до вологості 18–22%. В результаті отримують екструдат, вміст вологи в якому не перевищує 13–14%, що дозволяє уникнути застосування технологічного процесу сушіння. В таких екструдерах можна обробляти як ціле зерно, так і подрібнене [6]. При екструдванні цілого зерна продуктивність екструдера нижча, а питомі витрати електроенергії вищі. Щоправда, наявність мучнистої фракції при екструдванні подрібненого зерна часто призводить до «запикання» продукту в шнекові екструдера, що унеможливує його подальшу роботу. Тому доцільно подавати в екструдер подрібнене зерно з розміром частинок понад 1 мм після вилучення мучнистої фракції в просіювальній машині.

При виробництві спеціальних видів комбікормів (для лосося, для собак і кішок і т.д.) застосовують варильну екструзію (див. **Рисунок 4**). Розсипний комбікорм попередньо подрібнюють до розміру частинок від 0,2 до 0,5 мм і подають в горловину **1** варильного екструдера. Комбікорм надходить в кондиціонер **2**, в який подається водяна пара з тиском 0,1–0,2 МПа. Розігрійтий і зволожений комбікорм надходить в корпус екструдера **4**, в якому, як правило, розташовані два шнеки, що обертаються назустріч один одному. В робочу зону подається водяна пара (**5**) з тиском від 0,2 до 0,8 МПа. Комбікорм випресовується через матрицю **6**. Гранули екструдату зрізають ножами **7**, встановленими в захисному кожусі. Гранули екструдату, отримані у варильному екструдері, мають високий вміст вологи (22–25%) і потребують сушіння. Такий процес екструдвання більш витратний, проте дозволяє отримувати гранули екструдату будь якої форми та густини (див. **Рисунок 5**).

Технологічний процес експандування набув широкого застосування при за-

## Завдяки великій продуктивності і значним перевагам процес експандування набув поширення при виробництві комбікормів для промислового вирощування тварин та птиці

провадженні більш жорстких вимог до санітарної якості комбікормів в ЄС, США та інших країнах. Підвищення санітарної якості можна досягти, насамперед, застосовуючи процес екструдвання. Проте він призначений в першу чергу для підвищення поживної цінності кормової сировини і характеризується невисокою продуктивністю. Процес експандування за своєю суттю практично ідентичний процесу екструдвання і поєднує як функцію підвищення поживної цінності сировини і комбікормів, так і підвищення їх санітарної якості.

Експандер відрізняється від екструдера в першу чергу конструкцією пресуючої матриці [7]. На відміну від екструдера, в експандері процес пресування обробленої сировини відбувається через щільову матрицю кільцевого типу (див. **Рисунок 6**). Оскільки майже половина поверхні тертя набуває руху під дією окремого приводу, то питомі витрати електроенергії суттєво знижуються. Так, на екструдвання подрібненого зерна при попередньому зволоженні парою до 18–22% витрачається від 70 до 120 кВт·год/т, а при його експандуванні – від 15 до 35 кВт·год/т. Робочий зазор регулюється завдяки гідравлічній системі наближення або віддалення робочого конуса.

Вологість продукту в експандері становить 16–22%, а температура – до 120°C. Отриманий продукт (експандат) має вологість 13–14%, його температура становить 90–95°C. Експандат має вигляд кусків розміром від 20 до 50 мм. Його подрібнюють і просіюють для отримання комбікормової крупки, або для подальшого гранулювання.

В продукт, який обробляється в експандері, можна добавляти велику кількість рідких компонентів (до 20%), при цьому іноді виникає необхідність сушіння обробленого продукту. При подальшому гранулюванні подрібненого експандату продуктивність преса-гранулятора зростає майже на 100%. Причому міцність гранул можна регулювати шляхом зміни робочого зазору в щільовій матриці експандера.

За даними компанії Amandus KAHN GmbH (Німеччина) застосування експандерів дозволяє отримувати комбікорми високої санітарної якості для подальшого виробництва високоякісної продукції тваринництва і птахівництва (див. **Таблицю**).

Завдяки великій продуктивності і значним перевагам процес експандування набув поширення при виробництві комбікормів для промислового вирощування бройлерів і молодняка птиці, а також для тварин, що утримуються в умовах тваринницьких комплексів. **!**

### Література

1. Черняев Н.П. Технология комбикормового производства. - М.: Агропромиздат, 1985. - 255 с.
2. Pond W.G., Church D.C., Pond K.R. Basic animal nutrition and feeding. - 4-th edition. - New York.: John Wiley & Sons, 1995. - 615 p.
3. Kersten J., Rohde H.R., Nef E. Principles of mixed feed production. - Bergen.: Agrimedia GmbH, 2003. - 328 p.
4. Кириевский Б.Н., демченко П.Д., Ключкин В.В. Интенсивность развития полей влаги- и теплопереноса// масло-жир. пром-сть. - 1982. - №7. - С.16-19.
5. Афанасьев В.А. Теория и практика специальной обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов. - Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. - 296 с.
6. McElhiney R.R. (Ed.) Feed manufacturing technology IV. - Arlington.: American feed industry association, 1994 - 606 p.
7. Mian N.Riaz (Ed.) Extruders and expanders in pet food, aquatic and livestock feeds. - Clenze.: Agrimedia GmbH, 2007. - 387 p.

## Деякі показники санітарної якості комбікормів (за даними компанії Amandus Kahl)

Зараженість	Комбікорм для бройлерів		Комбікорм для свиней	
	Розсипний комбікорм	Експандат (100 °C)	Розсипний комбікорм	Експандат (100 °C)
Загальна, КУО/г	12 100 000	30 000	16 500	9 000
Колібактерії к-сть/г	110 000	0	400 000	0
Е-колібактерії, к-сть/г	400	0	90	0
Плісеневі гриби, к-сть/г	7 000	0	450	0
Сальмонели, к-сть/г	+	Не виявл.	Не виявл.	Не виявл.