



ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ТА ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУДЕРА З ПРУЖНИМ ГВИНТОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ НА ІНДЕКС РОЗШИРЕННЯ ЕКСТРУДАТУ

Кондратюк Дмитро Гнатович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет
Дмитренко Віктор Петрович, науковий співробітник
Інститут картоплярства УААН

Kondratyuk Dmytro Hnatovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Vinnitsa National Agrarian University;
Dmitrenko Victor Petrovich, Research Fellow,
Potato Institute of UAAS

Переробка кормів шляхом екструзії дозволяє підвищити рівень їх засвоєння тваринами. В екструдері за рахунок сил дисипації зернова маса розігрівається до температури 120...150 °С та набуває термопластичних властивостей. Внаслідок переміщення розігрітої маси із зони високого тиску в зону атмосферного відбувається адіабатичне розширення, в результаті якого спостерігається збільшення об'єму екструдату за рахунок руйнування зернистої структури крохмалю на клітинному рівні. Екструдат набуває мікропористої структури, придатної до впливу шлункового соку. Це сприяє більш повному засвоєнню поживних речовин організмом тварин. Дослідження проводилися з використанням макетного зразка екструдера секційної конструкції, витки гвинта якого можуть здійснювати коливання вздовж його вісі. В якості об'єкта дослідження використовувалась суміш, яка включала зерно кукурудзи, ячменю і озимої пшениці у масовому співвідношенні 5:3:2. Вивчення впливу параметрів і режимів роботи екструдера на індекс розширення екструдату здійснювали з використанням методу планування багатофакторних експериментів. Індекс розширення екструдату визначали як відношення діаметра екструдату до діаметра фільєри. Для вивчення процесу було вибрано наступні фактори, які найбільш суттєво впливають на процес екструзії та індекс розширення екструдату: діаметр фільєри $X_1(d, \text{мм})$, відносна вологість зернової суміші $X_2(W, \%)$ і температура процесу екструзії $X_3(T, ^\circ\text{C})$. Рівні варіювання факторів були наступними (спочатку записаний нульовий рівень факторів, а після інтервал варіювання): $X_1(6; 2 \text{ мм})$, $X_2(16; 4 \%)$ і $X_3(135; 25 ^\circ\text{C})$. В результаті проведених багатофакторних експериментів встановлено, що індекс розширення екструдату буде становити не менше 2,6 одиниць тоді, коли вологість зернової суміші буде знаходитись в межах 17,7...20,0 %, температура протікання процесу екструзії - 140...145 °С при діаметрі фільєри матриці 4,9...5,9 мм.

Ключові слова: екструдер, індекс розширення, екструдат, зерно, суміш, крохмаль, фільєра, температура, вологість.

Ф. 11. Рис. 3. Літ. 10.

1. Постановка проблеми

Переробка кормів шляхом екструзії дозволяє підвищити рівень їх засвоєння тваринами. Цей процес застосовують з метою отримання якісних кормів, які легко перетравлюються. Під час екструдуювання продукт піддається знезараженню, подрібненню, перемішуванню та частковому зневодненню. Проблема підвищення перетравності кормів особливо гостро проявляється при приготуванні комбікормів для молодняку тварин та птиці, тому що в них недостатньо розвинута секреція амілолітичних ферментів і крохмалю зерна, вміст якого, наприклад, у пшениці становить від 48 до 60 %, є для них важко перетравною сполукою [1, 2].

В екструдері за рахунок сил дисипації (внутрішнього тертя матеріалу і його тертя по шнеку та корпусу) зернова маса розігрівається до температури 120...150 °С та набуває термопластичних властивостей. Внаслідок переміщення розігрітої маси із зони високого тиску в зону атмосферного відбувається адіабатичне розширення («вибух»), в результаті якого відбувається збільшення об'єму екструдату за рахунок руйнування зернистої структури крохмалю на клітинному рівні. Екструдат



набуває мікропористої структури, придатної до впливу шлункового соку. Це сприяє більш повному засвоєнню поживних речовин організмом тварин [3].

Із вище викладеного випливає, що про якість роботи екструдера можна судити за значенням індексу розширення екструдату.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Індекс розширення екструдату, поширений критерій оцінки ступеня впливу технологічних факторів екструзійного процесу і технічних параметрів екструдера на структуру екструдатів, які отримують із сировини, що містить велику кількість крохмалю.

Автори [4], проводячи дослідження з підвищення кормової цінності екструдатів зернових культур за рахунок збагачення їх овочевими компонентами (морква, столові буряки) встановили, що коефіцієнт розширення екструдату зерна ячменю становить 3,17 і зменшується при збільшенні концентрації овочів. Найменший показник був при додаванні 22,5 % овочів і становив 1,02 - 1,05.

Можливість використання процесу екструдуювання для перероблення плодів жолудів і кінського каштана досліджували Подвальна О.О. і Шаран А.В. [5]. Отримані дані показали, що при збільшенні кількості каштанів і жолудів у суміші зростає об'ємна маса екструдату та кут природного ухилу. При цьому коефіцієнт спучування суміші (1:1) каштанів та кукурудзи становив 4,1-4,3.

Професор Курочкін А.О. з співавторами [6, 7, 8, 9] вважають, що в процесі екструзії поглинута сировиною механічна енергія сил зсуву і тертя акумулюються у вигляді теплової енергії, кількість якої суттєво впливає на індекс розширення екструдату і його пористість.

3. Мета дослідження

Визначити раціональні значення факторів, які найбільш суттєво впливають на процес екструзії і оцінити ступінь їх впливу на індекс розширення екструдату зернової суміші злакових культур.

4. Основні результати досліджень

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу екструзії та технічних параметрів екструдера на індекс розширення екструдату зернової суміші проводилися з використанням макетного зразка екструдера секційної конструкції, витки гвинта якого, в результаті сачків тиску в передматричній зоні, можуть здійснювати коливання вздовж його вісі. Зазначене сприяє збільшенню коефіцієнта заповнення міжвиткового простору гвинта, а відтак і продуктивності екструдера.

Вивчення впливу параметрів і режимів роботи екструдера на індекс розширення екструдату здійснювали з використанням методу планування багатофакторних експериментів.

Вихідну величину - індекс розширення екструдата (коефіцієнт спучення) визначали як відношення діаметра екструдату до діаметра фільтри.

Для вивчення процесу було вибрано наступні фактори, які найбільш суттєво впливають на процес екструзії та індекс розширення екструдату: діаметр фільтри $X_1(d, \text{мм})$, відносна вологість зернової суміші $X_2(W, \%)$ і температура процесу екструзії $X_3(T, ^\circ\text{C})$.

При виборі факторів виходили із наступного. Одним з основних конструктивних параметрів екструдера є діаметр отвору фільтри, оскільки він впливає на тиск оброблюваної сировини в зоні перед матрицею екструдера і продуктивність екструдера. При малих діаметрах фільтри можливе забивання отвору сировиною. Відбувається це внаслідок перевищення продуктивності гвинта екструдера над пропускною здатністю фільтри. Це призводить до заклинювання гвинта та запіканню продукту на ньому.

Одним із факторів, який впливає на процес екструзії є вологість сировини. Від вмісту вологи в сировині залежить температура переходу її у в'язко - текучий стан, а відтак ступінь її нагрівання за рахунок сил дисипації. Волога, змінюючи в'язкість розплаву, впливає на тепловий баланс екструдера, тобто призводить до зміни кількості виділеної теплоти в результаті тертя при гомогенізації, пластифікації, зсуву і стискання в процесі обробітку матеріалу. Крім того, вологість сировини впливає на її тиск в зоні перед матрицею екструдера, а відтак на інтенсивність «декомпресійного вибуху» при виході із фільтри. Волога в цьому випадку відіграє роль легкого компонента системи, який забезпечує пароутворення в ній при миттєвому скиданні тиску, а також різке охолодження і тверднення екструдата в процесі вибухового випаровування вологи.



Від перепаду температур в зоні перед матрицею екструдера і після виходу із неї залежить інтенсивність «декомпресійного вибуху» і розширення екструдату та ступінь руйнування крохмалю зерна.

Для проведення експериментів було вибрано наступні рівні варіювання факторів (спочатку записаний нульовий рівень факторів, а після інтервал варіювання): $X_1(6; 2 \text{ мм})$, $X_2(16; 4 \text{ \%})$ і $X_3(135; 25 \text{ }^\circ\text{C})$.

В якості сировини використовувалась суміш, яка включала зерно кукурудзи, ячменю і озимої пшениці у масовому співвідношенні 5:3:2.

Перед проведенням дослідів, вологоміром марки Grain Moisture Meter MD7822, визначали вологість кожного компонента суміші. Для отримання заданої, згідно плану експерименту вологості, компоненти висушували або додавали до них воду.

Масу води, необхідну для доведення порції компоненту до заданої, згідно плану експерименту, вологості визначали за формулою:

$$m = M \left(\frac{W_2 - W_1}{100 - W_2} \right), \quad (1)$$

де m – маса води, яку необхідно додати до компоненту, щоб довести його до заданої вологості, кг;

M – маса порції компоненту, кг;

W_1, W_2 – відповідно, початкова і необхідна вологість компоненту, %.

Рівномірно зволожений компонент не менше трьох годин витримували в герметичній тарі з періодичним перемішуванням. Для проведення кожного експерименту готувалась порція суміші масою не менше 10 кг.

При проведенні експериментів частота обертання гвинта екструдера підтримувалась перетворювачем частоти ALTIVAR-71 в межах 380...390 об/хв. Перевірку частоти обертання гвинта здійснювалась тахометром AR926.

Про температуру протікання процесу екструзії судили за температурою корпусу екструдера біля фільтри, яку фіксували пірометром RAYNGER ST20.

Для вивчення впливу вибраних факторів на вихідну величину був використаний не композиційний план Бокса B_3 , який включав 14 дослідів, проведених в трьох повтореннях [10].

Після реалізації плану експерименту, розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії та статистичного аналізу було отримано наступне рівняння, яке описує процес розширення екструдату

$$A = 2,48 - 0,13X_1 + 0,23X_2 + 0,14X_3 - 0,18X_1X_2 - 0,17X_1X_3 - 0,18X_1^2 - 0,25X_2^2 - 0,24X_3^2. \quad (2)$$

Отримане рівняння регресії (2) дозволяє оцінити ступінь як самостійного, так і спільного впливу основних параметрів процесу екструзії на вихідний параметр – індекс розширення екструдату A . Як видно із (2) найбільший вплив на індекс розширення екструдату чинить вологість зернової суміші $X_2(W, \text{ \%})$, а температура протікання процесу екструзії в більшій мірі впливає на індекс розширення екструдату, ніж діаметр фільтри.

Показники якості отриманої математичної моделі наступні. Коефіцієнт множинної кореляції $R = 0,98$, що свідчить про високий ступінь зв'язку між змінними. Коефіцієнт детермінації $D = 0,97$ свідчить про наявність досить тісної функціональної залежності між вхідними і вихідною змінною. В отриманій моделі в 97 % випадків зміна вхідних факторів призводить до зміни індексу розширення екструдату, а решта змін пов'язані з факторами, які не враховуються в моделі.

В рівнянні (2) змінні приведені в закодованій формі. Для одержання рівняння регресії в натуральному масштабі можна використати наступні співвідношення:

$$X_1 = (d - 6,5)/2; \quad (3)$$

$$X_2 = (W - 16)/4; \quad (4)$$

$$X_3 = (T - 135)/25. \quad (5)$$

З метою дослідження функції (2) на екстремум, визначимо стаціонарні точки її поверхні відгуку виходячи із наступної системи рівнянь:



$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta}{dX_1} &= -0,13 - 0,18X_2 + 0,17X_3 - 0,36X_3 = 0; \\ \frac{d\Delta}{dX_2} &= 0,23 - 0,18X_1 - 0,5X_2 = 0; \\ \frac{d\Delta}{dX_3} &= 0,14 + 0,17X_1 - 0,48X_3 = 0. \end{aligned} \right\}$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо наступні значення факторів у закодованому вигляді, при яких математична модель (2) буде мати екстремум: $X_{1S} = -1,13$; $X_{2S} = 0,87$ і $X_{3S} = 0,69$. Встановлення раціональних режимів роботи екструдера здійснювали шляхом побудови двовірних перетинів поверхні відгуку.

Дослідимо поверхню відгуку в координатах X_1 і X_3 . Підставивши значення фактора $X_{2S} = 0,87$ в (2), будемо мати:

$$\Delta = 2,49 - 0,29X_1 + 0,14X_3 - 0,17X_1X_3 - 0,18X_1^2 - 0,24X_3^2. \quad (6)$$

Підставивши значення $X_{1S} = -1,13$ та $X_{3S} = 0,69$ в (6), отримаємо значення індексу розширення екструдату в центрі поверхні відгуку $\Delta_S = 2,71$.

Виконаємо канонічне перетворення рівняння (6), для чого вирішимо характеристичне рівняння

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{ii} - B & 0,5b_{ij} \\ 0,5b_{ij} & b_{jj} - B \end{vmatrix} = 0.$$

Підставивши дані, будемо мати

$$f(B) = \begin{vmatrix} -0,18 - B & 0,5(-0,17) \\ 0,5(-0,17) & -0,24 - B \end{vmatrix} = 0$$

Звідки $B^2 + 0,42B + 0,03 = 0$.

Розв'язком цього рівняння є коефіцієнти: $B_{11} = -0,09$ і $B_{33} = -0,33$.

Тоді (6) в канонічній формі прийме вигляд:

$$\Delta - 2,71 = -0,09X_1^2 - 0,33X_3^2. \quad (7)$$

Кут суміщення нових осей координат з головними осями поверхні відгуку:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{b_{ij}}{b_{ii} - b_{jj}} = \frac{-0,17}{-0,18 - (-0,24)} = -2,83.$$

Тоді $2\alpha = -70,56^\circ$, а $\alpha = -35,28^\circ$.

Підставляючи різні значення індексу розширення екструдату Δ в (7) одержимо сімейство еліпсів, які характеризують рівень індексу розширення екструдату в залежності від зміни діаметра філь'єри d і температури екструдату T . Результати розрахунків графічно зображені на рис.1.

Якщо прийняти, що індекс розширення екструдату повинен бути більшим 2,60 одиниць, то розгляд двовірних перетинів зображених на рис. 1, показує, що при спільній дії діаметра філь'єри $d(X_1)$ та температури екструдату $T(X_2)$, може бути досягнута зазначена умова, якщо діаметр філь'єри буде знаходитись в межах 4,9...5,9 мм, а температура екструдату буде становити 131...145 $^\circ\text{C}$. Раціональний діапазон роботи екструдера на рисунку заштрихований.

Дослідимо поверхню відгуку в координатах X_1 і X_2 . Для цього підставимо значення фактора $X_{3S} = 0,69$ в (2). В результаті, одержимо наступне рівняння:

$$\Delta = 2,49 - 0,25X_1 + 0,23X_2 - 0,18X_1X_2 - 0,18X_1^2 - 0,25X_2^2. \quad (8)$$

Підставляючи значення $X_{1S} = -1,13$ і $X_{2S} = 0,87$ в (8), будемо мати значення індексу розширення екструдату в центрі поверхні відгуку $\Delta_S = 2,72$.

Виконаємо канонічне перетворення (8), для чого вирішимо характеристичне рівняння:

$$f(B) = \begin{vmatrix} -0,18 - B & 0,5(-0,18) \\ 0,5(-0,18) & -0,25 - B \end{vmatrix} = 0.$$

Звідки $B^2 + 0,43B + 0,04 = 0$.

Розв'язком цього рівняння є коефіцієнти: $B_{11} = -0,14$ і $B_{22} = -0,29$.

Тоді (8) в канонічній формі прийме вигляд

$$\Delta - 2,72 = -0,14X_1^2 - 0,29X_2^2. \quad (9)$$

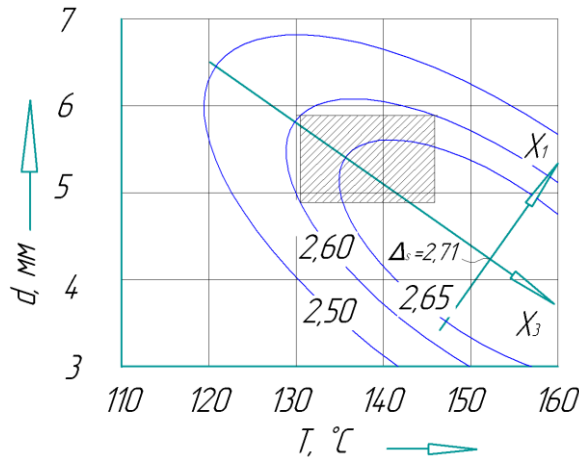
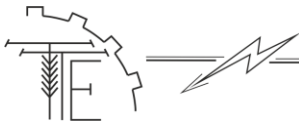


Рис. 1. Двомірні перетини поверхні відгуку, які характеризують зміну індексу розширення екструдату в залежності від діаметра філь'єри $d(X_1)$ та температури протікання процесу екструзії $T(X_3)$ при $W(X_2) = 0,87$

Кут суміщення нових осей координат з головними осями поверхні відгуку

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{b_{ij}}{b_{ii} - b_{jj}} = \frac{-0,18}{-0,18 - (-0,25)} = -2,57.$$

Тоді $2\alpha = -68,74^\circ$, а $\alpha = -34,37^\circ$.

Підставляючи різні значення індексу розширення екструдату Δ в (9), одержимо сімейство еліпсів, які характеризують рівень індексу розширення екструдату в залежності від зміни діаметра фільєри d і вологості зернової суміші W . Результати розрахунків графічно зображені на рис. 2. Аналіз представлених на рис. 2 двомірних перетинів показує, що індекс розширення екструдату не менше 2,60 одиниць буде тоді, коли діаметр філь'єри буде становити 4,0...6,0 мм, а вологість зернової суміші 17,7...20,0 %. Рациональний діапазон роботи екструдера на рис. 2 заштрихований.

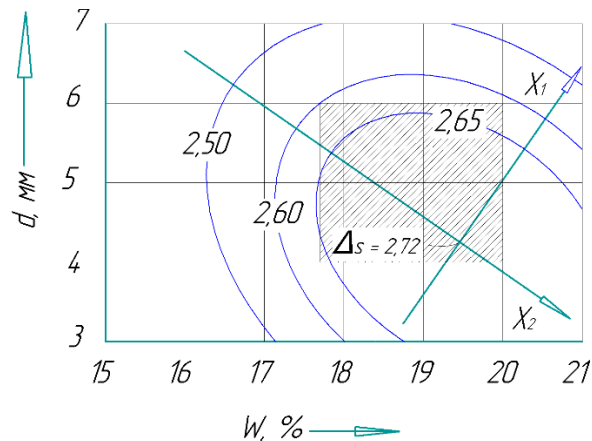


Рис. 2. Перетини поверхонь відгуку в координатах $d(X_1) - W(X_2)$, які характеризують зміну індексу розширення екструдату при $X_{3S} = 0,69$

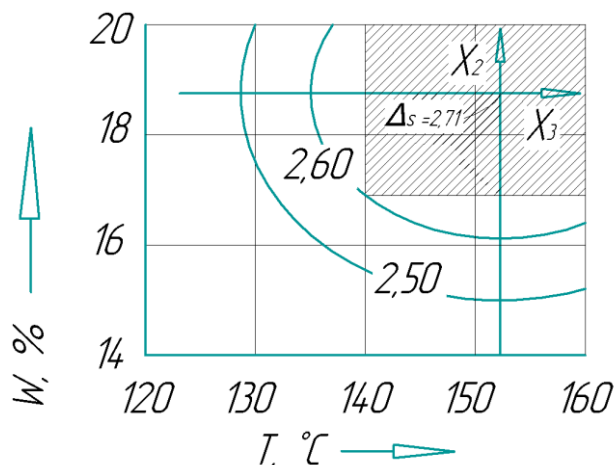
Дослідимо поверхню відгуку в координатах X_2 і X_3 . Для цього підставимо значення фактора $X_{1S} = -1,13$ в (2). В результаті, одержимо наступне рівняння:

$$\Delta = 2,40 + 0,43X_2 + 0,33X_3 - 0,25X_2^2 - 0,24X_3^2. \quad (10)$$

Підставляючи значення $X_{3S} = 0,69$ та $X_{2S} = 0,87$ в (10), отримаємо значення індексу розширення в центрі поверхні $\Delta_S = 2,71$. Тоді рівняння (10) в канонічній формі прийме вигляд:

$$\Delta - 2,71 = -0,25X_2^2 - 0,24X_3^2. \quad (11)$$

Підставляючи різні значення індексу розширення екструдату Δ в (11), одержимо сімейство еліпсів, які характеризують рівень індексу розширення екструдату в залежності від зміни вологості зернової суміші $W(X_2)$ і температури, при якій відбувається екструзія $T(X_3)$. Результати розрахунків графічно зображені на рис. 3.



**Рис. 3. Перетини поверхонь відгуку, які характеризують зміну
індексу розширення екструдату в залежності від вологості зернової суміші $W(X_2)$
та температури процесу екструзії $T(X_3)$ при $X_{1s} = -1,13$**

Із рис. 3 видно, що центр поверхні відгуку індексу розширення екструдату зміщений в сторону більших значень вологості зернової суміші $W(X_2)$ та температури процесу екструзії $T(X_3)$.

Розгляд двовірних перетинів, зображених на рис. 3 показує, що при спільній дії вологості зернової суміші $W(X_2)$, температури процесу екструзії $T(X_3)$ та діаметра фільтри, зафіксованого в центрі поверхні відгуку ($X_{1s} = -1,13$) індекс розширення екструдату буде становити не менше 2,60 одиниць тоді, коли вологість зернової суміші буде становити 17...20 %, а температура процесу екструзії буде становити 140...160 °C.

Узагальнюючі дані, які отримані в результаті аналізу двовірних перетинів, зображених на рис. 1–3 можна рекомендувати наступні раціональні параметри і режими роботи екструдера: діаметр фільтри $d=4,9...5,9$ мм, вологість зернової суміші $W = 17,7...20$ %, температура процесу екструзії $T = 140...145$ °C.

5. Висновки

Екструдуювання зерна злакових культур дозволяє перевести крохмаль в сприятливу для засвоєння організмом тварин форму.

Отримано рівняння регресії, яке описує процес розширення екструдату зернової суміші від діаметра фільтри, вологості зернової суміші та температури протікання процесу екструзії. Встановлено, що найбільший вплив на індекс розширення екструдату чинить вологість зернової суміші, а температура протікання процесу екструзії в більший мірі впливає на індекс розширення екструдату, ніж діаметр фільтри.

В результаті проведених багатофакторних експериментів з визначення індексу розширення екструдату зернової суміші, яка включала зерно кукурудзи, ячменю і озимої пшениці у масовому співвідношенні 5:3:2 встановлено, що індекс розширення екструдату буде становити не менше 2,6 одиниць тоді, коли вологість зернової суміші буде знаходитись в межах 17,7...20,0 %, температура протікання процесу екструзії -140...145 °C, при діаметрі фільтри матриці 4,9...5,9 мм.

Список використаних джерел

1. Краснов И. Н., Филин В. М., Глобин А. Н., Ладыгин Е. А. *Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: монография*. Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с.
2. URL: <http://www.activestudy.info/soderzhanie-kрахmala-v-pshenice-i-muke>.
3. Єгоров Б. В. Вивчення впливу екструдуювання на якість кормової добавки. *Зернові продукти і комбикорми*. 2013. №4 (52). С. 33–36.
4. Шаповаленко О.И., Евтушенко О. А., Ульянич И. Ф. Экструдирование кормовых смесей с включением нетрадиционных видов сырья. *Вестник Алмаатинского технологического университета*. Вып. 5(101), 2013. С.54–56.
5. Подвальна О. О., Шаран А. В. Екструдуювання нетрадиційної крохмалевмісної сировини. *Молодий вчений*. №1(41). 2017. С. 59–62.



6. Денисов С. В., Новиков В. В., Курочкин А. А., Шабурова Г. В. Определение пропускной способности зоны загрузки пресс –экструдера. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2009. №12. С. 73–76.
7. Шабурова Г. В., Курочкин А. А., Новиков В. В., Чистяков В. П. Белковый комплекс экструдированного ячменя. *Пиво и напитки*. 2007. №3. С. 12–13.
8. Курочкин А. А., Шабурова Г. В. Аминокислотный состав экструдированного ячменя. *Пиво и напитки*. 2008. №4. С. 12.
9. Курочкин А. А., Шабурова Г. В., Новиков В. В. Теоретические и практические аспекты экструзионной технологии в пивоварении. *Нива Поволжья*. 2007. №1. С. 20–24.
10. Бондарь А. Г., Статюха Г. А., Потяженко И. А. *Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры): Учебн. пособие*. Киев: Выща школа, 1980. 264 с.

Reference

- [1] Krasnov, I. N., Filin, V. M., Globin, A. N., Ladygin, E. A. (2014). *Proizvodstvo kombikormov v usloviyakh lichnykh podsobnykh i fermerskikh khozyajstv: monografiya [Combined feed production in the conditions of personal subsidiary and farming enterprises: monograph]*. Zernograd: FGBOU VPO AChGAA. [in Russian]
- [2] URL: <http://www.activestudy.info/soderzhanie-kraxmala-v-pshenice-i-muke>.
- [3] Yehorov, B. V. (2013). Vyvchennia vplyvu ekstruduvannia na yakist kormovoi dobavky [The study of the effect of extrusion on the quality of feed additives]. *Zernovi produkty i kombikormy*. №4 (52). S. 33–36. [in Ukrainian]
- [4] Shapovalenko, O. I. Evtushenko, O. A., Ulyanich, I. F. (2013). Ekstrudirovanie kormovyih smesey s vklucheniem netraditsionnyih vidov syrya [Extrusion of feed mixtures with the inclusion of unconventional types of raw materials]. *Vestnik Almaatinskogo tehnologicheskogo universiteta*. 5(101), 54–56. [in Russian]
- [5] Podvalna, O. O., Sharan, A. V. (2017). Ekstruduvannia netradytsiinoi krokhmalevmisnoi syrovyny [Extruding non-traditional starch-containing raw materials]. *Molodyi vchenyi*. №1 (41). 59–62. [in Ukrainian]
- [6] Denisov, S. V., Novikov, V. V., Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V. (2009). Opreделение propusknoy sposobnosti zonyi zagruzki press –ekstrudera [Determining the throughput of the press extruder loading zone]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. №12. 73–76. [in Russian]
- [7] Shaburova, G. V. Kurochkin, A. A., Novikov, V. V., Chistyakov, V. P. (2007). Belkovyyi kompleks ekstrudirovannogo yachmenya [Protein Complex Extruded Barley]. *Pivo i napitki*. № 3. 12–13. [in Russian]
- [8] Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V. (2008). Aminokislotnyi sostav ekstrudirovannogo yachmenya [Amino acid composition of extruded barley]. *Pivo i napitki*. 4. [in Russian]
- [9] Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V., Novikov, V. V. (2007). Teoreticheskie i prakticheskie aspektyi ekstruzionnoy tehnologii v pivovarenii [Theoretical and practical aspects of extrusion technology in brewing]. *Niva Pvolzhya*. №1. 20–24. [in Russian]
- [10] Bondar, A. G., Statyuha, G. A., Potyazhenko I. A. (1980). *Planirovanie eksperimenta pri optimizatsii protsessov himicheskoy tehnologii (algoritmy i primery): Uchebn. posobie [Planning an experiment in the optimization of chemical technology processes (algorithms and examples): Textbook. allowance]*. Kiev: Vyischa shkola. [in Russian]

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE EXTRUSION PROCESS AND TECHNICAL PARAMETERS OF AN EXTRUDER WITH ELASTIC SCREW ELEMENTS ON THE EXPANSION INDEX OF THE EXTRUDATE

The processing of feed by extrusion improves the level of absorption by animals. In the extruder, due to frictional forces, the grain mass is heated to a temperature of 120 ... 150 ° C and acquires thermoplastic properties. Due to the transition of the heated mass from the high-pressure zone to the atmospheric zone, adiabatic expansion occurs, as a result of which the volume of the extrudate increases due to the destruction of the granular structure of starch at the cellular level. The extrudate acquires a microporous structure, which contributes to a more complete absorption of nutrients by the animal body. The purpose of the work is to determine the rational values of the factors that most significantly influence the extrusion process and to evaluate the degree of their influence on the extrusion index of the grain mixture of cereals. The studies were



performed using a sample of the model extruder section structure, the coils of the screw extruder can oscillate along its axis. A blend of corn, barley and winter wheat in a 5: 3: 2 ratio was used as the study object. The effect of the extruder parameters and modes on the extrudate expansion index was studied using the multivariate experiment planning method. The extrudate expansion index was defined as the ratio of the extrudate diameter to the diameter of the die. To study the process, the following factors were selected that most significantly influence the extrusion process and the extrudate expansion index: die diameter X_1 (d , mm), relative humidity of the grain mixture X_2 (W , %) and temperature of the extrusion process X_3 (T , $^{\circ}\text{C}$). The levels of variation of the factors were as follows (initially recorded the zero level of factors, and after the interval of variation): X_1 (6; 2 mm), X_2 (16; 4%) and X_3 (135; 25 $^{\circ}\text{C}$). As a result of the conducted researches the following rational parameters and modes of operation of the extruder were established: diameter of die $d = 4.9 \dots 5.9$ mm; humidity of grain mixture $W = 17,7 \dots 20\%$; the temperature of the extrusion process $T = 140 \dots 145$ $^{\circ}\text{C}$, and a die diameter of 4.9 ... 5, 9mm.

Key words: extruder, expansion index, extrudate, grain mixture, starch, die, temperature, humidity.

F. 11. Pic. 3. Ref. 10.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУДЕРА С УПРУГОЙ ВИНТОВОЙ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИНДЕКС РАСШИРЕНИЕ ЭКСТРУДАТА

Переработка кормов путем экструзии позволяет улучшить уровень их усвоения животными. В экструдере за счет сил трения зерновая масса нагревается до температуры 120...150 $^{\circ}\text{C}$ та приобретает термопластичные свойства. Вследствие перехода разогретой массы из зоны высокого давления в зону атмосферного осуществляется адиабатическое расширение, в итоге которого увеличивается объем экструдата за счет разрушения зернистой структуры крахмала на клеточном уровне. Экструдат приобретает микропористую структуру, что способствует более полному усвоению питательных веществ организмом животных. Исследования осуществлялись с использованием макетного образца экструдера секционной конструкции, навивка винта которого может осуществлять колебания вдоль его оси. В качестве объекта исследования была выбрана смесь, которая содержала зерно кукурузы, ячменя и озимой пшеницы в массовом соотношении 5:3:2. Исследование влияния параметров и режимов работы экструдера на индекс расширения экструдата осуществляли с использованием метода планирования многофакторных экспериментов. Индекс расширения экструдата определяли как отношение диаметра экструдата до диаметра фильеры. Для изучения процесса были выбраны факторы, которые наиболее существенно влияют на индекс расширения экструдата: диаметр фильеры $X_1(d, \text{мм})$, влажность зерновой смеси $X_2(W, \%)$ и температура процесса экструзии $X_3(T, ^{\circ}\text{C})$. Уровни варьирования факторов были следующими (сначала записан нулевой уровень фактора, а после интервал варьирования): $X_1(6; 2 \text{ мм})$, $X_2(16; 4 \%)$ и $X_3(135; 25 ^{\circ}\text{C})$. В результате проведенных экспериментов определено, что индекс расширения экструдата будет составлять не менее 2,6 единицы при влажности зерновой смеси 17,7...20,0 %, температуре протекания процессу экструзии -140...145 $^{\circ}\text{C}$ и диаметре фильеры матрицы 4,9...5,9мм.

Ключевые слова: экструдер, индекс расширения, экструдат, зерновая смесь, крахмал, фильера, температура, влажность.

Ф. 11. Рис. 3. Лит. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Кондратюк Дмитро Гнатович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008).

Дмитренко Віктор Петрович – науковий співробітник, Інститут картоплярства УААН (ву. Чкалова, 22, Немішаєве, Київська обл., 07853)

Кондратюк Дмитрий Игнатьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Агроинженерии и технического сервиса Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г.Винница, Украина, 21008).

Дмитренко Виктор Петрович – научный сотрудник, Институт картофеляводства УААН (ул. Чкалова, 22, Немешаево, Киевская обл., 07853)

Dmytro Kondratyuk – PhD, Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Services of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnitsa, Ukraine, 21008).

Victor Dmitrenko – Research Fellow, Potato Institute of UAAS (st. Chkalova, 22, Nemeshaevo, Kiev region, 07853)