

УДК 637.5.02

В.І. ОСИПЕНКО, Н.В. ФІЛІМОНОВА, О.В. БАТРАЧЕНКО, С.О. ФІЛІМОНОВ

Черкаський державний технологічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРОДУКТИВНОСТІ ВОВЧКА

При теоретичному визначенні продуктивності м'ясорізальних вовчків за відомими виразами береться до уваги коефіцієнт використання шнека, при врахуванні якого значення продуктивності знижується на величину близько 70%. У відомій літературі відсутні вичерпні відомості з пояснення природи даного коефіцієнта та відсутні вирази, за якими можна було б його обрахувати. Нами запропоновано математичний вираз по визначенню коефіцієнта продуктивності вовчка. Він враховує особливості структурно-механічних властивостей м'яса та будову елементів різального вузла вовчка.

Ключові слова: м'ясорізальний вовчок, м'ясо, шнек, продуктивність.

VASILIIY IVANOVYCH OSIPENKO, NADYA VICTORIVNA FILIMONOVA, OLEXANDR VICTOROVICH
BATRACHENKO, SERGIY OLEXANDROVICH FILIMONOV

Cherkassy state technological university

THEORETICAL DEFINITION OF COEFFICIENT OF PRODUCTIVITY OF MEAT GRINDER

When determining theoretically the productivity of meat comminutor by known formulae, operating ratio of the screw, at the account of which the productivity value is reduced by the amount of about 70%, is taken into consideration. In the known literature there is no comprehensive information explaining the nature of this ratio and there are no formulae by which we could calculate it. We suggested a mathematical formula to determine the coefficient of productivity of the meat grinder. It takes into account both a reduction of the productivity of meat comminutor by reducing the pressuring capacity of the screw and a reduction of productivity through overlapping holes of the grades by the knife blades. This allows to take into account the peculiarities of structural and mechanical properties of the meat and structure of the elements of cutting node of the meat grinder. The results can be used in the design of the meat grinders and to justify highly productive ways of the meat supply to their cutting nodes.

Keywords: meat comminutor, meat, screw, productivity.

Постановка проблеми

Вовчки призначені для подрібнення кускового м'яса до стану фаршу. Ці машини використовуються на переважній більшості м'ясопереробних підприємств у складі різних технологічних ліній. Подальше вдосконалення вовчків неможливе без ґрунтовного розуміння робочих процесів, які відбуваються в них. Однією із проблем розвитку вовчків є недостатня точність відомих виразів, які застосовуються для проектних розрахунків, а саме – для розрахунку продуктивності.

Аналіз останніх джерел

Згідно [1-3] продуктивність вовчка визначають за продуктивністю $Q = f(K_{в.ш.})$, де $K_{в.ш.}$ — коефіцієнт подачі або використання шнеку ($K_{в.ш.} = 0,25 \div 0,35$). Таке низьке значення коефіцієнта, відповідно до [1, 2], пояснюється втратою сировини крізь зазори між шнеком та стінкою робочого циліндра, проковзуванням шнека об сировину при малій його довжині тощо. Однак, на нашу думку, втрата близько 70% від максимально можливої теоретичної продуктивності – це занадто велике значення для означених авторами [1, 2] факторів.

Розкрити сутність явища істотного зменшення максимально можливої теоретичної продуктивності вовчка можуть результати роботи [4], згідно яких при роботі шнека вовчка сировина ним подається лише в межах певного сектора, який відраховується від кінця витка шнека. Через це продуктивність вовчка знижується щонайменше удвічі. На нашу думку, саме означений ефект при роботі шнека обумовлює величину значення коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.} = 0,25 \div 0,35$. Актуальною є розробка теоретичних положень та математичного апарату, які б дозволяли визначати значення коефіцієнта, який враховує істотне зменшення максимально можливої теоретичної продуктивності вовчка

Метою роботи є: розробка математичного апарату, який би дозволяв визначати значення коефіцієнта продуктивності вовчка.

Виклад основного матеріалу

Пропонуємо при визначенні продуктивності вовчка оперувати не коефіцієнтом використання шнека, а коефіцієнтом продуктивності K_Q , який, як буде видно нижче, має більш комплексний характер.

Значення коефіцієнта продуктивності вовчка можна визначити, взявши до уваги усі основні чинники, які зумовлюють істотне зменшення його теоретично можливої продуктивності. На нашу думку, основним таким чинником є здатність м'ясої сировини до стискання під дією прикладеного навантаження. Саме це зумовлює необхідність достатньої деформації сировини задля подолання опору різального комплексу при продавлюванні сировини крізь нього. Звідси випливає, що важливими чинниками є геометрія шнеку та величина опору різального вузла. Іншим важливим чинником є будова різального вузла, а саме – будова ножів, які працюють в парі із решітками, оскільки згідно [3], збільшення кількості лез ножа та підвищення площі їх фронтальної проекції істотним чином зменшує площу, вільну для проходження м'яса крізь решітки. З огляду на зазначене, пропонуємо визначати коефіцієнт продуктивності вовчка K_Q , враховуючи як параметри шнека, так і параметри різального вузла.

Параметри шнека врахуємо за допомогою коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.}$, який являє собою

відношення площі поперечного перерізу робочого циліндру, яка окреслює зону подачі (відповідно до [4]) сировини шнеком у різальний вузол (сектор АОВ на рис. 1 б), до загальної площі поперечного перерізу робочого циліндру, який слугує для подачі сировини шнеком у різальний вузол. Якщо значення вказаних площ відобразити за допомогою значень відповідних кутів, то вираз для визначення коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.}$ набуде вигляду (рис. 1):

$$K_{в.ш.} = \frac{b_{max}}{360}, \tag{1}$$

де β_{max} – максимальне значення кута, який окреслює зону подачі сировини шнеком у різальний вузол, град.

Визначити значення β_{max} можна, склавши рівняння рівноваги сил, що діють на шар сировини, який останнім витком шнека подається у різальний вузол вовчка. Для того, щоб сировина набула можливості подолати силу опору різального вузла $F_{р.в.}$, необхідно створити відповідну силу стискання $F_{ст}$:

$$F_{ст} = F_{р.в.}, \tag{2}$$

У свою чергу дані сили визначаються наступним чином. Сила стискання, Н: $F_{ст} = [\sigma_{ст}] \cdot S_{ст}$, де $[\sigma_{ст}]$ – граничне значення напруження стискання, при якому починається процес продавлювання сировини крізь різальний вузол, Па; $S_{ст}$ – площа на боковій поверхні останнього витка шнека, яка відповідає площі шару сировини, що піддається стисканню, м². Сила опору різального вузла, Н:

$$F_{р.в.} = \sum_{i=1}^m F_{он.i} \cdot k_{пром} \cdot k_u,$$

де $F_{он.i}$ – сила опору i -ої решітки різального вузла, Н; m – кількість решіток різального вузла; $k_{пром}$ – емпіричний коефіцієнт збільшення опору різального вузла внаслідок збільшення відстаней поміж окремими решітками на величини товщини ножів; k_u – емпіричний коефіцієнт збільшення опору різального вузла внаслідок збільшення швидкості подачі сировини.

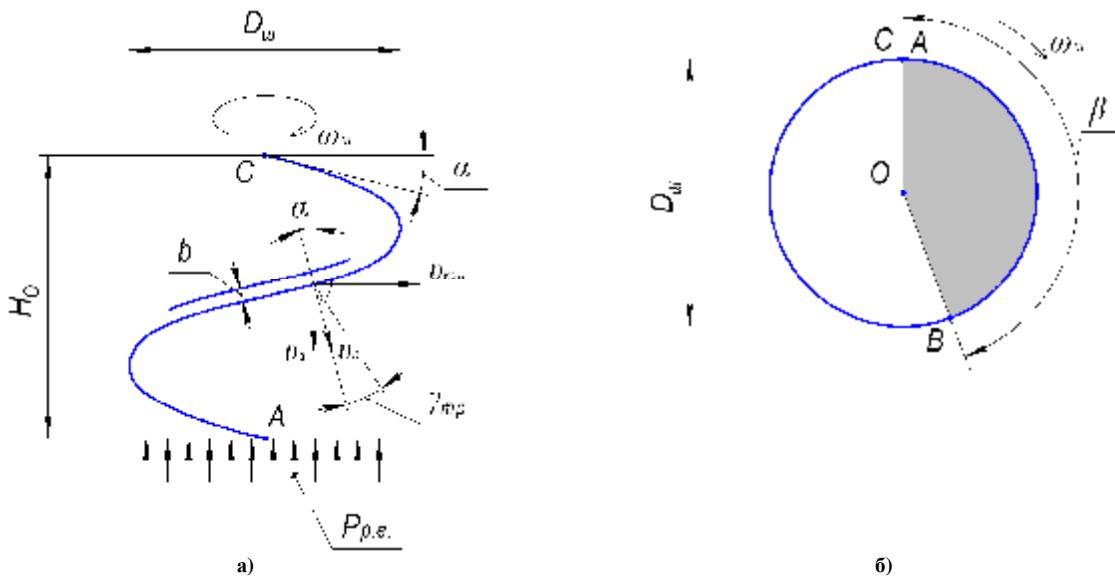


Рис. 1. Розрахункова схема останнього витка шнека при визначенні коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.}$ вовчка: а) – вид зверху; б) – вид з переду.

Сила опору кожної i -ої решітки різального вузла дорівнює:

$$F_{он.i} = F_{пен} + F_{зр} + F_{омв},$$

де $F_{пен} = q_{пен} \cdot S_{пен}$ – зусилля пенетрації сировини при обтіканні перемичок поміж отворами решітки, Н; $F_{зр} = q_{зр} \cdot S_{зр}$ – зусилля зрізу сировини при вдавлюванні в отвори, Н; $F_{омв} = P_{омв} \cdot S_{омв}$ – зусилля опору рухові сировини всередині отворів решітки, Н; $\theta_{пен}$ – напруження пенетрації сировини при обтіканні перемичок поміж отворами решітки, Па (визначається за [5]); $S_{пен}$ – площа перемичок поміж отворами, які обтікаються сировиною, м²; $\theta_{зр}$ – напруження зрізу сировини при вдавлюванні в отвори решітки, Па (визначається за [5]); $S_{зр}$ – площа отвору, в який вдавлюється сировина, м²; де $P_{омв}$ – тиск опору рухові сировини всередині отворів, Па; $S_{омв}$ – площа отвору, в який вдавлюється сировина, м².

Тиск опору рухові сировини всередині отворів решітки, відповідно до [3]:

$$P_{омв} = \left(\frac{q_0}{k_{\sigma}} \right) \cdot e^{\frac{4f \cdot k_{\sigma} \cdot B_p}{d_0}} - \frac{q_0}{k_{\sigma}},$$

де f – коефіцієнт тертя сировини об стінки каналу; B_p – товщина решітки, м; d_0 – діаметр отвору, м; q_0 – залишковий боковий тиск, Па; k_{σ} – коефіцієнт бокового тиску.

Вказані значення площ запишуться наступним чином (розглядаємо випадок, коли площа поперечного перерізу шару сировини, який продавлюється, дорівнює сумі площ одного отвору решітки та відповідної частки перемичок поміж отворами):

$$S_{oms} = \frac{p \cdot d_0^2}{4}, S_{sp} = \frac{p \cdot d_0^2}{4}, S_{nen} = \frac{p \cdot d_0^2}{4} \left(\frac{1-j}{j} \right), S_{cm} = S_{oms} + S_{nen} = \frac{p \cdot d_0^2}{4} \cdot \frac{1}{j},$$

де φ – коефіцієнт перфорації решітки, який дорівнює відношенню сумарної площі отворів для проходження сировини до загальної площі решітки (активна частина решітки – диск, окреслений граничними точками лез обертового ножа, який працює в парі з решіткою).

Значення коефіцієнту $k_{пром}$ можна визначити за [6]. Значення коефіцієнту k_v визначимо відповідно до даних експериментальних досліджень [6]: $k_u = e^{a_u} \cdot u_o^{b_u}$, де v_o – осьова швидкість подачі сировини, м/с; a_u, b_u – емпіричні коефіцієнти, значення яких залежить від подовження отворів решітки та виду сировини.

Середнє значення лінійної швидкості руху сировини при її подачі останнім витком шнека визначимо так (рис. 1 а). Середнє значення колової швидкості при обертанні витка шнека –

$$u_{кол} = w_{ш} \cdot \left(\frac{D_{ш}}{2} - \frac{h}{2} \right), \text{ де } h \text{ – глибина гвинтового каналу шнека. Її нормальна до поверхні шнека складова –}$$

$$u_n = u_{кол} \cdot \sin \alpha. \text{ З урахуванням кута } \gamma_{mp} \text{ тертя сировини об поверхню шнека: } u_n = \frac{u_{кол} \cdot \sin \alpha}{\cos \gamma_{mp}}. \text{ Тоді осьова}$$

швидкість переміщення сировини (за умови, що на внутрішній поверхні циліндру, в якому працює шнек, наявні прямолінійні ребра і сировина рухається на кшталт гайки, яка приводиться у рух обертовим гвинтом) буде визначатись наступним чином:

$$u_o = u_n \cdot \cos(\alpha + \gamma_{mp}) = \frac{u_{кол} \cdot \sin \alpha}{\cos \gamma_{mp}} \cdot \cos(\alpha + \gamma_{mp}) = \frac{p \cdot n_{ш} \cdot (D_{ш} - h) \cdot \sin \alpha}{\cos \gamma_{mp}} \cdot \cos(\alpha + \gamma_{mp}),$$

де $n_{ш}$ – частота обертання шнека, c^{-1} .

Далі визначимо напруження, які виникають в шарі сировини при його стисканні. Напруження в сировині, відповідно до закону Гука [7], прямо пропорційні відношній її деформації ε та модулю пружності E :

$$S_{cm} = e \cdot E, \quad (3)$$

де ε – відносна деформація; E – модуль пружності при стисканні, Па.

Значення кінцевої відносної деформації сировини при її подачі останнім витком шнека вовчка:

$$e_{o,k} = e_{o,k} \cdot k_e, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{o,k}$ – кінцева відносна деформація сировини, яка відбулась саме в зоні останнього витка шнека і яка виміряна в місці прилягання останнього витка до різального вузла; k_e – коефіцієнт деформації, який визначає ступінь попереднього деформування сировини при її потрапленні в зону останнього витка шнеку, причому:

$$k_e = \frac{V_{зан.}}{V_{o-1}}, \quad (5)$$

де $V_{зан.}$ – об'єм міжвиткового простору шнека, в якому коефіцієнт його заповнення сировиною дорівнює 1;

V_{o-1} – об'єм міжвиткового простору шнека, який знаходиться перед останнім витком.

Для часткового випадку будови шнека з постійними значеннями $D_{ш}$ і $d_{ш}$ вираз (5) набуде вигляду:

$$k_e = \frac{H_{зан.}}{H_{o-1}},$$

де $H_{зан.}$ – крок міжвиткового простору шнека, в якому коефіцієнт його заповнення сировиною дорівнює 1; H_{o-1} – крок міжвиткового простору шнека, який знаходиться перед останнім витком.

Значення відносної деформації шару сировини при русі саме в зоні останнього витка шнека (рис. 2):

$$e_o = \frac{H_o - l}{H_o} = \frac{p \cdot D_{ш} \cdot \operatorname{tg} \alpha - L_{AB} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{p \cdot D_{ш} \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

де H_o – крок останнього витка шнека; l – відстань від поверхні останнього витка до різального вузла ($l = L_{AB} \cdot \operatorname{tg} \alpha$); $D_{ш}$ – зовнішній діаметр шнека; α – кут нахилу гвинтової поверхні шнека; L_{AB} – довжина дуги АВ.

Довжина дуги АВ відрізняється від довжини кола діаметром $D_{ш}$ в стільки разів, в скільки разів відрізняється величина кута β від 360° : $L_{AB} = p \cdot D_{ш} \frac{\beta}{360}$. Тоді визначити значення відносної деформації шару сировини, положення якого визначається кутом β (див. рис. 1), можна так:

$$e_o = \frac{p \cdot D_{ш} \cdot \operatorname{tg} \alpha - p \cdot D_{ш} \frac{\beta}{360} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{p \cdot D_{ш} \cdot \operatorname{tg} \alpha} = 1 - \frac{\beta}{360} \quad (7)$$

де β – поточне значення кута, який окреслює зону подачі сировини шнеком у різальний вузол, град.

В той же час, відносна деформація, відповідно до кінетичного рівняння [7], залежить від прикладеного тиску наступним чином

$e = a_e \cdot P^{a_1} (1 + a_2 \cdot \lg t) = 5,2 \cdot P^{0,32} (1 + 0,058 \cdot \lg t)$, де P – прикладений тиск, Па; τ – тривалість деформації, с; a_e, a_1, a_2 – коефіцієнти, які залежать від геометричних і механічних факторів та фізико-хімічного стану сировини (для м'яса $a_e=5,2$; $a_1=0,32$; $a_2=0,058$). При цьому, згідно [7], значення тиску в шарі сировини залежить від відстані до точки прикладання тиску - $P_l = P \cdot e^{(-0,115 \cdot l \cdot D_{ш}^{-0,33})}$, де P – значення тиску, прикладеного до шару сировини, Па; l – відстань від точки прикладання тиску до шуканої точки, м; $D_{ш}$ – діаметр циліндра, в якому відбувається стискування сировини, м.

Враховуючи, що зміні тиску P вздовж відстані l відповідатиме зміна відносної деформації сировини ε , при розгляді деформування сировини останнім витком шнека (7), врахуємо зміну відносної деформації вздовж відрізка l :

$$e_{o.k.} = \left(1 - \frac{b}{360}\right) \cdot e^{-0,037 \cdot l \cdot D_{ш}^{-0,33}} \quad (8)$$

де $l = L_{AB} \cdot \operatorname{tg} a = p \cdot D_{ш} \cdot \frac{b}{360} \cdot \operatorname{tg} a$ - відстань від поверхні останнього витка до різального вузла.

Підставимо отримані часткові вирази у вихідне рівняння (2) і, скоротивши $S_{омб}$, визначимо значення кута β , град:

$$\left(1 - \frac{b}{360}\right) \cdot \left(e^{-0,037 \cdot p \cdot D_{ш} \cdot \frac{b}{360} \cdot \operatorname{tg} a \cdot D_{ш}^{-0,33}} \right) \cdot \frac{H_{зан.}}{H_{o-1}} \cdot \frac{E}{j} = \\ = \left(q_{нен} \cdot \left(\frac{1-j}{j} \right) + q_{зр} + \left(\frac{q_0}{k_\sigma} \right) \cdot e^{\frac{4f \cdot k_\sigma \cdot B_p}{d_0}} - \frac{q_0}{k_\sigma} \right) \cdot \left(\frac{p \cdot k_{нром} \cdot n_{ш} \cdot e^{a_u} \cdot (D_{ш} - h) \cdot \sin a \cdot \cos(a + g_{mp})}{\cos g_{mp}} \right)^{b_u} \quad (9)$$

Рівняння (9) можна розв'язати лише чисельними методами, тому для практичних розрахунків введемо спрощення, згідно якого зміна деформації по товщині шару сировини не враховується. Тоді значення кута β_{max} , який окреслює зону подачі сировини шнеком у різальний вузол, буде, град:

$$b = 360 - 360 \left(q_{нен} \cdot \left(\frac{1-j}{j} \right) + q_{зр} + \left(\frac{q_0}{k_\sigma} \right) \cdot e^{\frac{4f \cdot k_\sigma \cdot B_p}{d_0}} - \frac{q_0}{k_\sigma} \right) \times \\ \times \left(\frac{j \cdot k_{нром} \cdot H_{o-1}}{E \cdot H_{зан.}} \right) \left(\frac{p \cdot n_{ш} \cdot e^{a_u} (D_{ш} - h) \sin a \cdot \cos(a + g_{mp})}{\cos g_{mp}} \right)^{b_u} \quad (10)$$

Використовуючи вирази (9), (10) можемо визначити значення коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.}$ за виразом (1).

Визначимо коефіцієнт продуктивності вовчка K_Q (рис. 3). Його можна визначити, як відношення площі активної частини решітки $S_p^{акт}$, крізь яку може подаватись сировина і яка обмежена кутом β_{max} , до загальної площі решітки S_p :

$$K_Q = \frac{S_p^{акт}}{S_p} \quad (11)$$

Площа активної частини решітки визначається так:

$$S_p^{акт} = S_{сек} - S_n^{акт} \quad (12)$$

де $S_{сек} = j \cdot \frac{P}{4} (D_p^2 - d_p^2) \frac{\beta_{max}}{360}$ - площа кільцевого сектора, обмеженого кутом β_{max} ; $S_n^{акт} = S_l^{акт} \cdot z_l^{акт}$ -

площа фронтальних проекцій лез ножа, що знаходяться в зоні подачі сировини, яка окреслена кутом β_{max} ;

$S_p = j \cdot \frac{P}{4} (D_p^2 - d_p^2)$ - площа решітки; D_p - зовнішній діаметр решітки; d_p - діаметр центрального отвору

решітки; $S_l^{акт}$ - площа фронтальної проекції одного леза ножа, яке знаходиться в зоні подачі сировини, що окреслена кутом β_{max} ; $z_l^{акт}$ - кількість лез ножа, які знаходяться в зоні подачі сировини, що окреслена

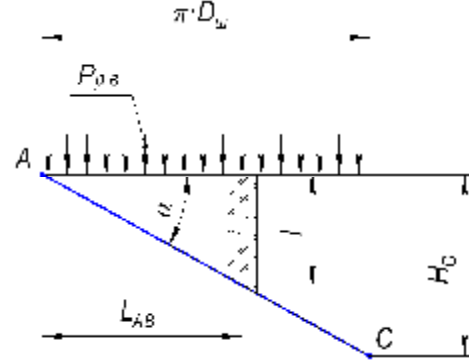


Рис. 2. Розрахункова схема розгортки останнього витка шнека при визначенні коефіцієнта використання шнека $K_{в.ш.}$ вовчка

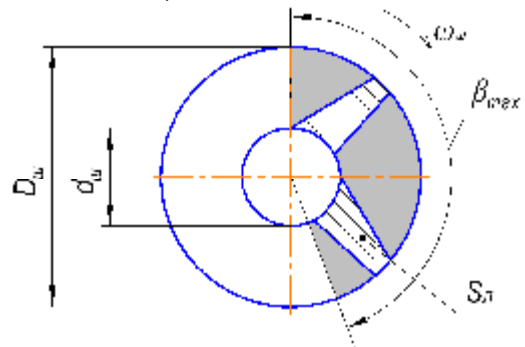


Рис. 3. Розрахункова схема останнього витка шнека (вид спереду) при визначенні коефіцієнта K_Q продуктивності вовчка

кутом β_{\max} .

Тоді, після елементарних перетворень, кінцевий вираз по визначенню коефіцієнта продуктивності вовчка K_Q набуде вигляду:

$$K_Q = \frac{b_{\max}}{360} - \frac{4S_l^{акт} \cdot z_l^{акт}}{j \cdot p (D_p^2 - d_p^2)}. \quad (13)$$

З урахуванням рівняння (10):

$$K_Q = 1 - \frac{S_l^{акт} \cdot z_l^{акт}}{j \cdot \frac{p}{4} (D_p^2 - d_p^2)} - \left(q_{\text{нев}} \cdot \left(\frac{1-j}{j} \right) + q_{\text{зр}} + \left(\frac{q_0}{k_\sigma} \right) \cdot e^{\frac{4f \cdot k_\sigma \cdot B_p}{d_0}} - \frac{q_0}{k_\sigma} \right) \times \\ \times \left(\frac{j \cdot k_{\text{пром}} \cdot H_{o-1}}{E \cdot H_{\text{зап.}}} \right) \left(\frac{p \cdot n_{\text{ш}} \cdot e^{a_u} (D_{\text{ш}} - h) \sin a}{\cos g_{\text{мп}}} \cdot \cos(a + g_{\text{мп}}) \right)^{h_u}. \quad (14)$$

Висновки

У роботі запропоновано математичний вираз по визначенню коефіцієнта продуктивності вовчка. Він враховує, як зменшення продуктивності вовчка внаслідок зменшення нагнітальної здатності шнека, так і зменшення продуктивності через перекриття лезами ножа отворів решіток. Це дозволяє врахувати особливості структурно-механічних властивостей м'яса та будову елементів різального вузла вовчка. Отримані результати можуть бути використанні при проектуванні вовчків та для обґрунтування високопродуктивних способів подачі м'яса до їх різального вузла.

Література

1. Пелеев А. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / А. И. Пелеев. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 537 с.
2. Чижикова Т. В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов / Т. В. Чижикова. – М.: Легкая промышленность, 1982. – 240 с.
3. Батраченко О. В. Підвищення ефективності роботи та довговічності м'ясорізальних машин: дис... кандидата техн. наук: 05.18.12 / Батраченко Олександр Вікторович. – Вінниця, 2014. – 284 с.
4. Некоз О.І. Дослідження інтенсивності зношування лез ножа вовчка / О. І. Некоз, Н. В. Філімонова, С. О. Філімонов, О. В. Батраченко, А. В. Хом'як // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 2. – С.84-96.
5. Філімонова, Н. В. Дослідження структурно-механічних властивостей м'яса, як об'єкту переробки у вовчку / Н. В. Філімонова // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 7. – С. 13-19.
6. Некоз О. І. Гідравлічний опір різального вузла вовчків / О. І. Некоз, В. І. Осипенко, Н. В. Філімонова, О. В. Батраченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 6. – С. 13-19.
7. Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов / А. В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.

Рецензія/Peer review : 7.10.2015 р.

Надрукована/Printed :1.11.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією