

УДК 635.25.002.71
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.86472

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ЦИБУЛІ РІПЧАСТОЇ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ ОЧИЩЕННЯ

О. Г. Терешкін

Доктор технічних наук, професор
Кафедра готельного та ресторанного бізнесу**

E-mail: tereshkin09@mail.ru

Д. В. Горєлков

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: gorelkov.dmv@gmail.com

Д. В. Дмитревський

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

В. М. Червоний

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: chervonyi.v@gmail.com

*Кафедра устаткування харчової і
готельної індустрії ім. М. І. Беляєва**

**Харківський державний університет
харчування та торгівлі

вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051

Досліджено процес механічної обробки цибулі ріпчастої під час її очищення комбінованим способом. Визначено раціональні параметри проведення комбінованого процесу очищення цибулі ріпчастої. Отримано величину необхідного коефіцієнта заповнення робочої камери апарата для очищення цибулі ріпчастої. Запропоновано математичну модель процесу механічної обробки цибулі ріпчастої під час її очищення. Розраховано мінімальну частоту обертання робочої камери апарата

Ключові слова: цибуля ріпчаста, комбінований процес, параметри очищення, попереднє проварювання, механічна обробка

Исследован процесс механической обработки лука репчатого во время его очистки комбинированным способом. Определены рациональные параметры проведения комбинированного процесса очистки лука репчатого. Получена величина необходимого коэффициента заполнения рабочей камеры аппарата для очистки лука репчатого. Предложена математическая модель процесса механической обработки лука репчатого во время его очистки. Рассчитана минимальная частота вращения рабочей камеры аппарата

Ключевые слова: лук репчатый, комбинированный процесс, параметры очистки, предварительный провар, механическая обработка

1. Вступ

В умовах сучасного економічного розвитку виникає необхідність створення нових ресурсозберігаючих процесів та обладнання, які відповідатимуть світовим вимогам. При цьому повинні суворо контролюватися такі показники, як якість виробленої продукції та екологічна безпека проведення виробничих процесів.

Виробництво продуктів харчування з овочевої сировини має важливе економічне та соціальне значення. Овочі відіграють важливу роль у харчуванні всіх категорій населення, що обумовлює необхідність присутності їх в щоденному раціоні людей. Тому, безпечність і якість цих харчових продуктів, відсутність фізичного, хімічного і мікробіологічного забруднення повинна бути гарантована виробниками та переробниками. Для гарантування безпечності виробники повинні застосовувати контрольні заходи вздовж всього ланцюга виробничого процесу – одержання, переробки і збереження овочів. Ці вимоги передбачають високу якість та екологічну чистоту продукції, а також максимальну механізацію та автоматизацію процесів [1]. Одним з основних завдань для овочепереробної промисловості є використання сучасних передових технологій під час виробництва продукції [2]. Але інтенсивність темпів

розвитку знижена за рахунок низького ступеня механізації більшості процесів переробки овочевої сировини, високим відсотком використання ручної праці. Внаслідок цього неможливе виготовлення продукції, яка б відповідала європейським та світовим вимогам [3].

Одним зі шляхів забезпечення обраного напрямку на ресурсозбереження та енергозощадження є розробка та впровадження у виробництво нових технологій та обладнання для очищення плодовоовочевої сировини. Незважаючи на те, що на теперішній час використовується достатня кількість обладнання для проведення процесу очищення овочів, існує багато проблемних питань, які необхідно вирішувати. Відомо, що під час проведення процесу очищення значна частина цієї сировини втрачається. Це відбувається внаслідок морального та фізичного зносу створеного раніше обладнання для реалізації процесу очищення. Більшість розроблених процесів очищення плодовоовочевої сировини втратили свою актуальність, оскільки характеризуються значними енерговитратами та низькими показниками якості продукції [4].

Перспективним напрямком інтенсифікації та механізації процесу очищення плодовоовочевої сировини є розробка нових спеціалізованих апаратів, принцип дії яких засновано на поєднанні термічних та механіч-

них процесів [5]. Реалізація інноваційних комбінованих способів очищення ускладнюється відсутністю комплексних досліджень в цьому напрямку в цілому, зокрема відповідної інформації щодо характерних структурно-механічних, фізико-механічних та теплофізичних властивостей плодоовочевої сировини, методик та експериментальних установок для визначення їх впливу на параметри процесів.

На сучасному етапі розвитку суспільства актуальним і важливим пріоритетним напрямом, що забезпечує більш раціональне використання ресурсів, є розробка та впровадження нових технологічних процесів [6]. На сьогоднішній день спостерігається інтенсивний розвиток харчової та переробної промисловості й впровадження нових прогресивних технологій, енерго- і ресурсозберігаючих ефективних технологічних процесів переробки сировини із максимальним збереженням харчової й біологічної цінності [7].

Але слід констатувати, що продуктивність праці на українських підприємствах, які переробляють сільськогосподарську сировину, в 2–4 рази нижче, ніж на аналогічних підприємствах розвинених країн; близько 50 % трудомістких операцій виконуються вручну і лише 10 % діючого обладнання працює в автоматичному режимі [8]. Для вирішення проблеми переробки сільськогосподарської сировини необхідно розробляти технічні засоби не тільки для промислової переробки сільськогосподарської сировини, а і налагоджувати випуск малогабаритної техніки для підприємств ресторанного господарства, міні-цехів у фермерських господарствах і приватних підприємствах. Економічно доцільно застосовувати універсальне і багатоопераційне компактне обладнання, в якому реалізується декілька процесів, що дозволить переробляти різні види сировини та випускати різноманітну продукцію із стабільними показниками якості. Розробка та впровадження в серійне виробництво екологічно безпечного енергозберігаючого обладнання нового покоління, що реалізує принципово нові комбіновані методи комплексної переробки сільськогосподарської сировини є актуальною та пріоритетною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Переробка овочевої сировини має важливе значення на підприємствах харчової промисловості та ресторанного господарства. Одним з найбільш трудомістких процесів, які використовуються на підприємствах ресторанного господарства, є процес очищення овочевої сировини. Для очищення овочів використовують наступні способи очищення: фізичний (термічний), пароводотермічний, хімічний, механічний, комбінований та обпалювання повітрям. Усі вище наведені способи очищення від внутрішньої неїстівної частини на сьогодні досягли високого ступеня розвитку та ефективно використовуються у переробній промисловості. З наведених способів механічний спосіб очищення набув найбільш широкого використання завдяки низьким енерговитратам на забезпечення процесу, відносній простоті конструкцій устаткування, екологічності, зручності в обслуговуванні [9]. Але для механічного способу очищення характерні високі втрати сировини.

Незважаючи на низький рівень механізації процесу очищення цибулі ріпчастої в закладах ресторанно-

го господарства необхідно проаналізувати можливу доцільність та ефективність застосування способів та апаратів, що використовуються на підприємствах овочепереробної промисловості. Комплексна обробка цибулі проводиться, як правило, на цибулеочисних лініях, що включають ряд машин і допоміжних механізмів [10]. Лінія містить машину для сортування цибулі, механізми для висвердлювання донця і обрізання шийки ножом з притисочною вилкою, фрикційні установки періодичної дії для очищування цибулин від лущиння з механізмом тимчасового контролю тривалості операцій, ваги для визначення кількості завантажувального матеріалу і водоструйну мийку.

На деяких овочесушильних заводах експлуатується універсальна лінія для підготовки та сушіння цибулі. Лінія складається з машин для підготовки цибулі до сушки, сушарки та обладнання з обробки сушеної цибулі. Лінія забезпечує вироблення сушеної цибулі, нарізаної кільцями, дробленої і цибуленого порошку [11]. Кількість відходів становить під час експлуатації ліній складає від 20 до 26 %. Враховуючи габаритні розміри та високу продуктивність технологічної лінії, використання її у закладах ресторанного господарства недоцільне.

Під час масової переробки цибулі використовується спосіб її очищення за допомогою двоокису вуглецю. Машина для реалізації цього способу комплектується до устаткування для очищення лущиння з використанням хімічних речовин, що дозволяє полегшити та підвищити надійність відділення луски від цибулин і скоротити витрати води [12]. Розглянута машина потребує значних виробничих площ, має великі габаритні розміри, є високопродуктивною, тому що розрахована на великі переробні підприємства, і не може використовуватися в закладах ресторанного господарства.

Ще одним питанням, яке виникає та потребує вирішення в процесі переробки цибулі ріпчастої, є очищення підмороженої та замороженої цибулі. Конструкція пристрою для очищення замороженої цибулі має певні особливості експлуатації [13]. Недоліками цього пристрою є низька якість очищення, значна кількість відходів та втрати цінної частини цибулини із лущинням за рахунок очищення зрізанням, необхідність контролю рівня цибулі для забезпечення реалізації процесу очищення, неможливість використання в закладах ресторанного господарства.

Гідравлічний спосіб очищення цибулі, який застосовується переважно на овочесушильних заводах, характеризується певними особливостями застосування, основною серед яких є необхідність подальшого доочищення цибулин. Під час очищення некаліброваної цибулі в мийній машині отримано: повністю очищених 39 % цибулин, що вимагають потім обрізки шийки і донця, очищених наполовину 38 % і не очищених 23 % цибулин [14]. Продуктивність праці на доочищенні цибулі, після попередньої обробки її в мийній машині, збільшилася на 36 %, в порівнянні з ручним способом.

Представлений огляд устаткування для очищення цибулі ріпчастої свідчить про неможливість використання існуючих зразків, призначених для використання в овочепереробній промисловості, в закладах ресторанного господарства. Крім того, представлене устаткування не забезпечує якісного очищення цибулі від шкірки і має певні недоліки. Машини для попере-

дньої обробки цибулі виконують, як правило, одну операцію. Під час використання машини для попередньої обробки цибулі з одночасним підвищенням продуктивності, порівняно з ручною обробкою, збільшуються втрати на очищення. Для здійснення технологічного процесу попередньої обробки цибулі як правило створюються лінії з серії одноопераційних машин, які завжди мають різну продуктивність і можливості, в зв'язку з чим лінії є габаритними і малопродуктивними. Під час використання лінії для очищення цибулі від лушпиння обов'язково потрібна окрема машина, а при використанні лінії для очищення цибулі від донця і шийки потрібне обов'язкове якісне калібрування кожної цибулини і окрема машина [15]. Процес різання цибулі виконується в окремих машинах, що потребує певний час для перевантаження очищеної цибулі, а це знижує якість продукції при використанні цибулеочисних ліній. Після закінчення обробки необхідно виконувати ручне доочищення і сортування сировини [16]. У машинах і лініях попередньої обробки цибулі значну частку займає ручна праця, оскільки відомі машини не дозволяють забезпечити виконання всіх основних технологічних операцій попередньої обробки цибулі.

Таким чином, відомі машини для попередньої обробки цибулі не є універсальними, малоефективні, мають обмежений сегмент використання.

Виходячи з аналізу представлених способів очищення та установок для їх реалізації, ефективності їх роботи та можливостей застосування в закладах ресторанного господарства і овочепереробних підприємствах можна зробити висновок, що проблема очищення на теперішній час повністю не вирішена. Одним зі шляхів забезпечення обраного напрямку на ресурсозбереження та енергозощадження є розробка та впровадження у виробництво екологічно безпечного обладнання, що реалізує принципово нові комбіновані способи комплексної переробки різних видів сільськогосподарської сировини із стабільними показниками якості. Реалізація в одному апараті декількох процесів дає можливість вилучити додаткове обладнання для калібрування, сортування, миття, доочищення, що, в свою чергу, забезпечить безпеку під час виробництва продукції, сприяючи більш раціональному використанню ресурсів [17].

На підставі проведеного аналітичного огляду літературних даних доведено, що під час очищення цибулі ріпчастої значна частина сировини втрачається та відсутній ефективний контроль за якістю кінцевої продукції. Відомі машини для очищення цибулі малоефективні, потребують додаткового обладнання і виконання ручного доочищення та мають обмежений сегмент використання.

Перспективним напрямом інтенсифікації та автоматизації процесу якісного очищення цибулі ріпчастої є розробка апарата для очищення цибулі ріпчастої АЦР-10/160 нового спеціалізованого апарата, принцип дії якого засновано на синтезі термічного, гідродинамічного та механічного процесів обробки. Країна виробник – Україна. Конструкція апарата захищена патентом України на винахід № 106813 [18].

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження процесу механічної обробки цибулі ріпчастої під час її очищення комбі-

нованим способом та визначення раціональних параметрів проведення комбінованого процесу очищення цибулі ріпчастої.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- розробити методики та експериментальні установки для проведення процесу механічного очищення та дослідження його впливу на якість очищення та відсоток втрат цибулі ріпчастої;
- визначити вплив тривалості попереднього проварювання паром поверхневого шару цибулі ріпчастої та конструктивних параметрів робочого барабана на максимальну ступінь очищення сировини;
- дослідити залежність ступеня очищення цибулин від коефіцієнта заповнення робочого об'єму барабана та глибини провару продукту;
- створити математичну модель процесу механічного доочищення сировини для визначення найбільш раціонального руху продукту у барабанному пристрої апарата.

4. Матеріали та методи дослідження процесу механічної обробки овочевої сировини

Для того, щоб мінімізувати втрати сировини та одночасно покращити якість очищення поверхні цибулі ріпчастої, виникає потреба в проведенні досліджень стосовно визначення тривалості проведення процесу механічного очищення, залежно від зусилля відділення її лушпиння.

В розробленій експериментальній установці (рис. 1) пропонується використовувати в якості робочої камери барабан, що обертається. Виходячи з обраних вище чинників, які необхідно дослідити, розроблено методику дослідження процесу. Детально дана методика дослідження процесу механічної обробки овочевої сировини наведена в роботі [19].

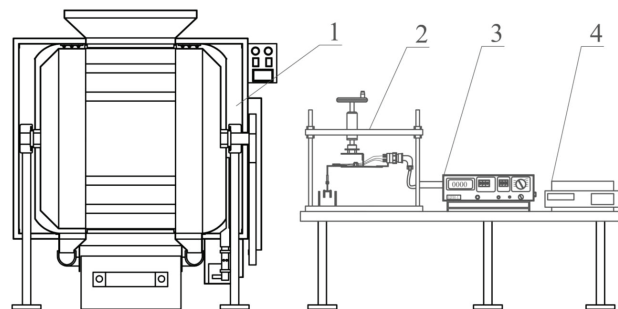


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для дослідження процесу очищення цибулі ріпчастої:
1 – експериментальний барабанний модуль;
2 – тензометричний модуль; 3 – ЦТІ-1; 4 – ваги електронні

5. Результати досліджень математичного моделювання процесу механічної обробки цибулі ріпчастої та визначення раціональних параметрів проведення процесу її очищення

Для теоретичного моделювання процесу механічного очищення цибулі у запропонованому пристрої барабанного типу скористаємося загальною теорією

барабаних млинів. Ця теорія розглядає рух шару твердих сферичних частинок у барабані, який обертається з певною частотою. Цю модель можна поширити на рух ріпчастої цибулі у запропонованому пристрої, оскільки основні припущення моделі залишаються тими самими:

- частинки – тверді кульки з діаметром за багато меншим діаметра барабана;
- для режиму розвинутого руху шару частинок розглядається рівняння руху тільки однієї частинки;
- частинка знаходиться у контакті з внутрішньою поверхнею барабана до моменту відриву від нього;
- у момент відриву частинка втрачає контакт з барабаном.

В залежно від частоти обертання барабана існує три робочих режими руху шару частинок (рис. 2), які визначаються відношенням частоти обертання до критичної частоти:

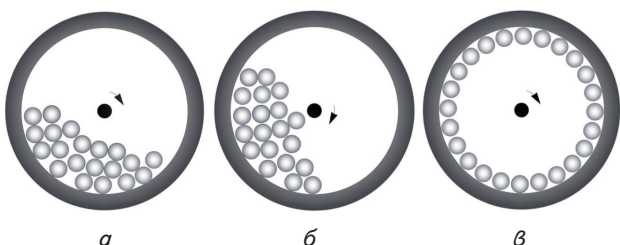


Рис. 2. Схема руху твердих частинок у барабані залежно від частоти обертання: а – режим I, $n=0,4...0,6n_{кр}$; б – режим II, $n=0,6...0,8n_{кр}$; в – режим III, $n \geq n_{кр}$

Критична частота обертання барабана визначається за умов рівності відцентрової сили та сили тяжіння:

$$m\omega^2 R = mg \tag{1}$$

Звідки з урахуванням зв'язку між циклічною частотою та частотою обертання $\omega = \pi n / 30$ отримуємо:

$$n_{кр} = \frac{29,9}{\sqrt{R}}, \tag{2}$$

де m – маса частинки, кг; ω – циклічна частота обертання барабана, рад/с; $n_{кр}$ – частота обертання барабана, хв⁻¹; R – внутрішній радіус барабана, м.

У першому режимі руху шару частинок при $n = 0,4...0,6n_{кр}$ має місце рівноважний стан шару без руйнування його форми за рахунок того, що сили тертя та сили тяжіння перевищують відцентрову силу та основна взаємодія між частинками та внутрішньою поверхнею барабана відбувається за рахунок тертя. Шар частинок під дією сили тертя намагається піднятися до гори, але зростаюча складова сили тяжіння з часом примушує весь шар пересунути у рівноважний стан. Періодично такий коливальний рух повторюється. З точки зору процесу очищення цибулі це є неефективний режим, оскільки рівноважна всіх сил прикладених до цибулини може бути менше за зусилля відділення її луски.

Третій режим при $n \geq n_{кр}$ також неефективний з точки зору очищення, бо в ньому відсутній рух цибулини відносно внутрішньої поверхні барабана із зрізаючими отворами.

Очевидно, що оптимальним режимом є другий режим при $n = 0,6...0,8n_{кр}$, коли шар цибулин втрачає рівноважний стан та з'являються сили ковзання відносно внутрішньої поверхні барабана, які разом із силою тертя визначають зусилля різання шийки та денця цибулин. При цьому видалення луски відбувається за рахунок тертя між окремими цибулинами.

Виходячи з цього аналізу визначимо теоретичні умови роботи пристрою для очищення цибулі в оптимальному режимі. Спочатку отримаємо необхідні геометричні співвідношення (рис. 4).

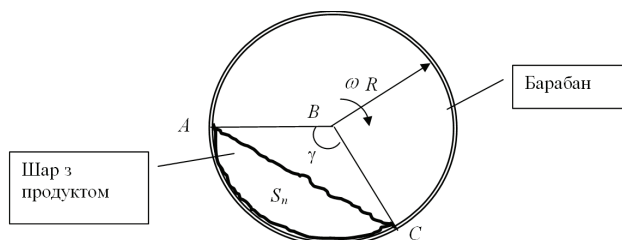


Рис. 3. Схема розміщення шару цибулі у барабані

Знайдемо величину коефіцієнта заповнення барабана:

$$\beta = \frac{S_n}{S_0}, \tag{3}$$

де β – коефіцієнт заповнення барабана шаром продукту; S_0 – площа поперечного перерізу барабана; m^2 ; S_n – переріз барабана зайнятий продуктом, m^2 .

Величину S_n знайдемо як різницю площ сектора АСВА та трикутника АВС з підставою АС.

$$S_n = S_{\cup ACBA} - S_{\triangle ABC} \tag{4}$$

Очевидно:

$$S_{\cup ACBA} = \frac{\gamma}{2\pi} \pi R^2, \tag{5}$$

$$S_{\triangle ABC} = \frac{1}{2} 2R \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot R \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{1}{2} R^2 \sin(\gamma), \tag{6}$$

де γ – центральний кут сегмента з продуктом, рад.

Відповідно площа шару продукту:

$$S_n = \frac{\gamma}{2\pi} \pi R^2 - \frac{1}{2} R^2 \sin(\gamma). \tag{7}$$

Підставляючи (7) в (3), та враховуючи площу поперечного перерізу барабана:

$$S_0 = \pi R^2, \tag{8}$$

отримуємо величину коефіцієнта заповнення барабана шаром продукту:

$$\beta = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin(\gamma)). \tag{9}$$

Маса продукту в апараті знайдемо з урахуванням насипної густини продукту та коефіцієнта заповнення барабана продуктом:

$$m_n = \rho_{nn} S_n b = \frac{1}{2} \rho_{nn} R^2 b (\gamma - \sin(\gamma)), \quad (10)$$

де ρ_{nn} – насипна густина продукту, кг/м³; b – довжина барабана, м.

Відстань до центру мас сегмента продукту визначається за відомою формулою:

$$r_{nc} = \frac{4}{3} R \frac{\sin^3(\gamma/2)}{\gamma - \sin \gamma}, \quad (11)$$

де r_{nc} – відстань від осі обертання барабана до центру мас сегмента продукту.

Наступним кроком визначимо граничні умови існування першого режиму руху шару цибулин, коли шар зберігає свою форму та рухається як єдине ціле. Це, як вказувалось вище, не є оптимальним режимом з точки зору очищення, але саме граничні умови цього режиму визначають мінімальну частоту обертання барабана вище якої настає другий – оптимальний режим роботи пристрою.

Знайдемо зв'язок куту α_1 , на який можна повернути шар продукту відносно горизонтальної осі барабана без порушення його форми (рис. 4).

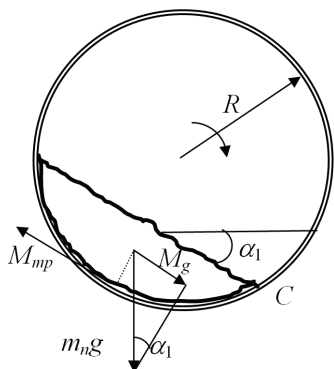


Рис. 4. Схема сил, які визначають кут підйому шару продукту α_1 у першому режимі роботи барабана

Рівновага сегмента продукту масою m_n визначається з умови рівності протилежно спрямованих моментів сил – тертя M_{tp} і рушійної складової M_g ваги $M_g = m_n g \sin(\alpha_1)$. Сила тертя F_{tp} записується як добуток коефіцієнта зовнішнього тертя f_{tp} і сили нормального тиску; остання є сумою відцентрової сили, яка діє на центр тяжіння сегмента $F_{nc} = m_n r_{nc} \omega^2$ і радіальної складової сили тяжіння $m_n g \cos(\alpha_1)$, тобто

$$F_{tp} = f_{tp} (m_n r_{nc} \omega^2 + m_n g \cos \alpha_1). \quad (12)$$

Плече сили тертя дорівнює радіусу барабана R , плече рушійної сили тяжіння дорівнює відстані до центру мас сегмента r_{nc} (14). Рівність зазначених моментів визначає умови рівноваги суцільного сегмента продукту:

$$f_{tp} (m_n r_{nc} \omega^2 + m_n g \cos \alpha_1) R = m_n g \sin \alpha_1 \cdot r_{nc}. \quad (13)$$

Останнє рівняння зручно представити для аналізу у безрозмірному вигляді. Після нескладних перетворень отримуємо

$$Fr = \frac{1}{f_{tp}} \sin \alpha_1 - \frac{3}{4} \frac{\gamma - \sin \gamma}{\sin^3(\gamma/2)} \cos \alpha_1, \quad (14)$$

де $Fr = \frac{\omega^2 R}{g}$ – число Фруда; R – радіус барабана, м; ω – циклічна частота обертання барабана, рад/с; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Очевидно, що максимальний кут підйому сегмента продукту дорівнює куту природного скосу шару цибулин $\max(\alpha_1) = \alpha_y$ та максимальний центральний кут сегмента з продуктом при цьому $\gamma = 180^\circ$, оскільки при більших значеннях кутів α_1 та γ суцільний сегмент продукту буде руйнуватись (верхні цибулини сегмента почнуть перекочуватися по його зовнішній поверхні). З урахуванням цих міркувань граничне значення числа Фруда для першого режиму руху дорівнює:

$$Fr_{min} = \frac{1}{f_{tp}} \sin \alpha_y - \frac{3}{4} \frac{\pi - \sin \pi}{\sin^3(\pi/2)} \cos \alpha_y. \quad (15)$$

Якщо підставити у (15) значення кута природного скосу шару цибулин $\alpha_y = 40^\circ$ та коефіцієнта тертя цибулини по металу $f_{tp} = 0,29$, то отримуємо умову для визначення мінімальної частоти обертання барабана:

$$Fr_{min} = 0.41. \quad (16)$$

Тобто

$$\omega_{min} = \sqrt{\frac{Fr_{min} g}{R}}, \quad (17)$$

або з урахуванням зв'язку між циклічною частотою та частотою обертання

$$n_{min} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{0.41g}{R}} = \frac{19.19}{\sqrt{R}}, \quad (18)$$

де n_{min} – мінімальна частота обертання барабана, хв⁻¹; R – радіус барабана, м.

Зазначимо, що ця формула справедлива тільки для максимального припустимого навантаження барабана у першому режимі руху, яке легко розрахувати підставляючи у формулу (9) значення $\gamma = \pi$, тоді $\beta_{max} = 0,5$.

Якщо навантаження буде меншим, то перший режим руху продукту у барабані буде відбуватися за більших частот обертання, оскільки зростає момент рушійної сили $m_n g \sin \alpha_1 \cdot r$ (за рахунок r_{nc}), та щоб його компенсувати треба підвищувати силу нормального тиску. Ця залежність на підставі (15) та даних для цибулі $\alpha_y = 40^\circ$ $f_{tp} = 0,29$ має наступний вигляд:

$$Fr_{min} = 2,22 - 0,58 \frac{\gamma - \sin \gamma}{\sin^3(\gamma/2)}. \quad (19)$$

У цій формулі центральний кут сегмента з продуктом змінюється в інтервалі $0 < \gamma \leq \pi$, що відповідає коефіцієнту навантаження згідно з (9) в межах $0 < \beta \leq 0,5$. Формула (19) разом з (18) дозволяє розрахувати мінімальну частоту обертання барабана для переходу в оптимальний режим руху шару цибулі при довільному навантаженні барабана на відміну від (16).

Як зазначалось вище, оптимальні умови для очищення цибулі в барабані виникають в другому режимі руху її шару (рис. 2, б), верхню межу якого є критична частота обертання (2). Слід зазначити, що формула (2) не відповідає реальній ситуації, бо при її отриманні

зроблено припущення проте, що шар продукту нескінченно тонкий, тобто коефіцієнт завантаження барабана $\beta \rightarrow 0$. При реальних завантаженнях цибулини в барабані будуть займати певний об'єм, товщина їх шару для третього режиму руху пов'язана з коефіцієнтом завантаження очевидним співвідношенням:

$$\beta = \frac{\pi R^2 - \pi R_1^2}{\pi R^2}, \quad (20)$$

де R_1 – внутрішній радіус шару продукту, м.
Звідки

$$R_1 = R\sqrt{1-\beta}. \quad (21)$$

Умови рівноваги шару продукту у третьому режимі руху будуть визначитись відцентровою силою для найменшого радіуса шару тобто

$$m\omega_{\max}^2 R_1 = mg, \quad (22)$$

звідки з урахуванням (21) та виразу для числа Фруда отримуємо граничну умову для критичної (максимальної) частоти обертання барабана:

$$Fr_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta}}. \quad (23)$$

При числах Фруда більших за Fr_{\max} третій режим руху буде забезпечений для всього шару продукту. Таким чином, оптимальний режим роботи пристрою для очищення цибулі визначається наступним діапазоном:

$$Fr_{\min} < Fr < Fr_{\max}. \quad (24)$$

З урахуванням (19), (23) і (9) отримуємо

$$2,22 - 0,58 \frac{\gamma - \sin \gamma}{\sin^3(\gamma/2)} < Fr < \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2\pi}(\gamma - \sin(\gamma))}}. \quad (25)$$

Для практики зручніше використовувати у якості аргументу ні центральний кут сегмента з продуктом γ , а коефіцієнт заповнення барабана β , але виразити зв'язок $\gamma(\beta)$ з трансцендентного рівняння (9) не можливо, тому запропоновано наближене рівняння, знайдене методом регресійного аналізу, яка описує точне рішення (2) з похибкою 5% у межах $\beta=0,2 \dots 0,8$ (рис. 5).

$$\gamma(\beta) = 3,04 \left(\frac{0,99\beta}{1-\beta} \right)^{0,22}. \quad (26)$$

Тоді умову (26) можна записати через коефіцієнт заповнення барабана:

$$2,22 - 0,58 \frac{\gamma(\beta) - \sin[\gamma(\beta)]}{\sin^3[\gamma(\beta)/2]} < Fr < \frac{1}{\sqrt{1-\beta}}. \quad (27)$$

На рис. 6 побудовані залежності визначального критерію Фруда від коефіцієнта заповнення барабана цибулею. Як вже обговорювалось вище, область оптимальних режимів роботи пристрою для очищення цибулі знаходиться між лініями максимального та мінімального чисел Фруда, тобто відповідає режиму II.

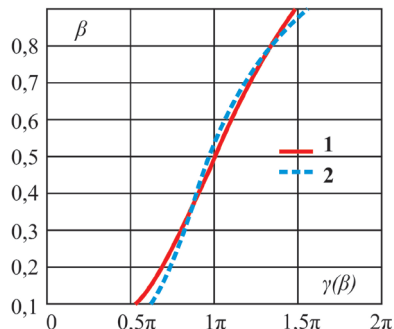


Рис. 5. Зв'язок між коефіцієнтом заповнення барабана та центральним кутом сегмента з продуктом: 1 – рівняння (9); 2 – наближене рівняння (26)

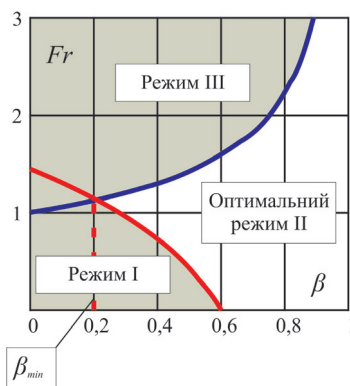


Рис. 6. Залежність граничних значень числа Фруда від коефіцієнта заповнення барабана цибулею

Зі зменшенням коефіцієнта заповнення діапазон оптимальних режимів звужується та при значеннях $\beta < 0,2$ другого режиму руху шару цибулин у барабані не існує, тобто можливо існування або першого, або третього режиму руху, але як зазначалось на початку розділу вони є неефективними з точки зору механічного очищення. Треба зазначити, що наведені результати безумовно підлягають експериментальному уточненню, оскільки отримана модель тільки у першому наближенні відображає складні реальні процеси, які відбуваються при русі продукту у відцентровому барабані. Ці дані були використані при плануванні подальших експериментальних досліджень, метою яких було пошук оптимальних режимів роботи пристрою для механічного очищення цибулі.

Ефективність відділення луски цибулі після термічної обробки можна оцінити шляхом вимірювання величини зусилля відділення луски від цибулі. На рис. 7 наведена залежність впливу тривалості термічної обробки цибулі на зусилля відділення її луски.

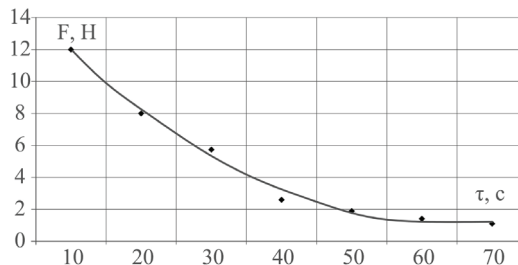


Рис. 7. Залежність зусилля відділення луски цибулі ріпчастої від тривалості її обробки паром

Зменшення величини зусилля відділення луски буде відбуватися внаслідок послаблення зв'язку між клітинами поверхневого шару цибулі ріпчастої. Проведенні дослідження дозволили з'ясувати, що під час процесу механічного очищення глибина термічної обробки цибулі ріпчастої буде суттєво впливати на відсоток втрат сировини, а зусилля відділення луски впливатиме на відсоток очищених цибулин та тривалість процесу механічного очищення цибулі. Для того щоб підвищити якість очищення та мінімізувати втрати сировини, необхідно визначити всі фактори, які впливають на даний процес. Безпосередній вплив на процес механічного очищення буде мати тривалість проведення цього процесу. Збільшення тривалості процесу механічного очищення приводить до підвищення втрат сировини, але їх зменшення може привести до погіршення якості очищення продукту.

Для того, щоб мінімізувати втрати сировини та одночасно покращити якість очищення поверхні цибулі ріпчастої, виникає потреба в проведенні досліджень стосовно визначення тривалості проведення процесу механічного очищення, залежно від зусилля відділення її луски. Результати цих досліджень представлені на рис. 8.

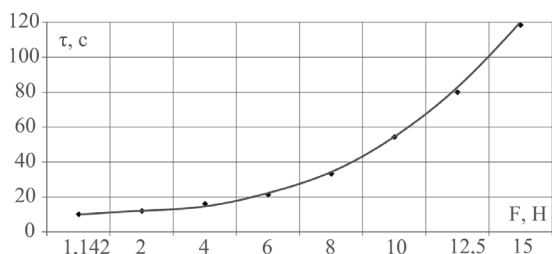


Рис. 8. Залежність тривалості механічного очищення цибулі ріпчастої від зусилля відділення її луски

Наведені результати досліджень вказують на те, що цибуля, лущиння якої відділяється з більшим зусиллям, потребує більш тривалого механічного очищення.

Кореляційним аналізом встановлено, що найбільшу ступінь кореляції мають відсоток очищених цибулин та товщина провару поверхневого шару цибулини. Тому, методами регресійного аналізу (табл. 1) було знайдено наступну залежність відсотка очищених цибулин від товщини провару їх поверхневого шару:

$$П = a_1 + a_2 \cdot \delta + a_3 \cdot \delta^2, \tag{28}$$

де П – відсоток очищених цибулин, %; δ – товщина провару поверхневого шару цибулини, мм; a₁ – регресійні коефіцієнти.

На рис. 9–11 наведено розрахункові дані, побудовані згідно з моделлю (28) для визначення відсотка очищених цибулин від товщини провару поверхневого шару цибулини.

Отримані дані дозволяють стверджувати, що максимальне значення ступеня очищення цибулин наближається до 100 %, при чому при невеликому коефіцієнті заповнення барабана 0,3...0,5 спостерігаються два екстремуми в діапазоні товщини провару 4...4,5 мм для K_y=0,3 та 3,5...5 для K_y=0,5. Криві розбиваються на два сімейства: криві 1, 2, 4 мають меншу площу отворів барабана

ніж криві 3, 5, 6. В той же час, для коефіцієнта заповнення барабана 0,7 такий екстремум тільки один для δ=4,8 мм.

Таблиця 1

Значення регресійних коефіцієнтів для різних форм і діаметрів отворів

Форма та діаметр отворів	a ₁	a ₂	a ₃
коефіцієнт завантаження 0,3			
Коло, 12 мм	-111	95	-11.46
Коло, 17 мм	-94	75	-7.99
Коло, 22 мм	-312	176	-18.96
Еліпс, 12×18 мм	-104	92	-11.19
Еліпс, 17×23 мм	-134	103	-11.86
Еліпс, 22×28 мм	-265	163	-18.21
коефіцієнт завантаження 0,5			
Коло, 12 мм	-168	135	-17.96
Коло, 17 мм	-101	74	-7.44
Коло, 22 мм	-318	174	-18.09
Еліпс, 12×18 мм	-107	87	-9.75
Еліпс, 17×23 мм	-152	104	-11
Еліпс, 22×28 мм	-445	230	-24.28
коефіцієнт завантаження 0,7			
Коло, 12 мм	-121	76.3	-7.09
Коло, 17 мм	-132	90.7	-9.53
Коло, 22 мм	-278	157.6	-16.63
Еліпс, 12×18 мм	-17	7.6	2.02
Еліпс, 17×23 мм	-176	105.3	-10.52
Еліпс, 22×28 мм	-130	100.8	-11.09

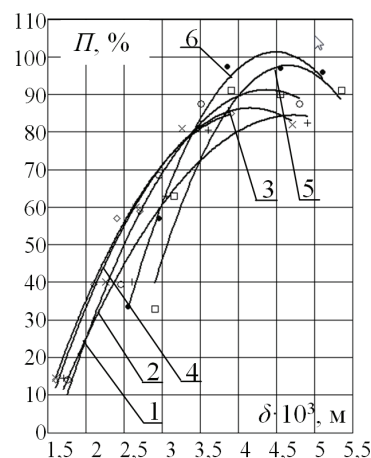


Рис. 9. Вплив товщини провару поверхневого шару цибулини на ступінь очищення цибулин за коефіцієнта завантаження 0,3 та форми і діаметра отворів:
1 – коло, 12 мм; 2 – коло, 17 мм; 3 – коло, 22 мм; 4 – еліпс, 12×18 мм; 5 – еліпс, 17×23 мм; 6 – еліпс, 22×28 мм

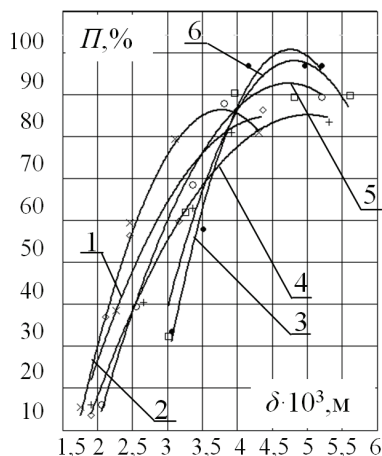


Рис. 10. Вплив товщини провару поверхнього шару цибулини на ступінь очищення цибулин за коефіцієнта завантаження 0,5 та форми і діаметра отворів:
 1 – коло, 12 мм; 2 – коло, 17 мм; 3 – коло, 22 мм;
 4 – еліпс, 12×18 мм; 5 – еліпс, 17×23 мм; 6 – еліпс, 22×28 мм

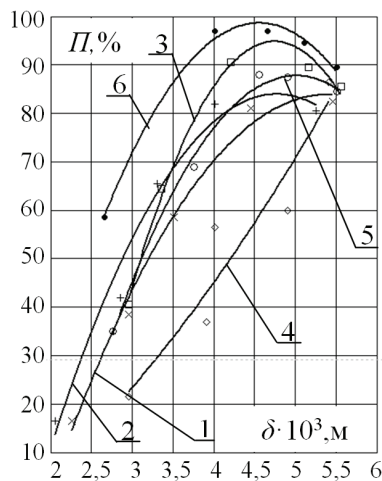


Рис. 11. Вплив товщини провару поверхнього шару цибулини на ступінь очищення цибулин за коефіцієнта завантаження 0,7 та форми і діаметра отворів:
 1 – коло, 12 мм; 2 – коло, 17 мм; 3 – коло, 22 мм;
 4 – еліпс, 12×18 мм; 5 – еліпс, 17×23 мм; 6 – еліпс, 22×28 мм

Таким чином, залежно від коефіцієнта заповнення максимум ступеня очищення спостерігається для отворів з більшою площею, але за різної глибини провару.

Окремо розглянемо питання про раціональну швидкість обертання барабана під час механічного очищення.

На рис. 12 наведено результати регресійного аналізу залежності ступеня очищення від частоти обертання барабана.

Як видно, оптимальне значення частоти обертання за показником кількості видалених частин цибулини відповідає значенню 100 хв⁻¹.

Відповідне регресійне рівняння має наступний вигляд:

$$K = -168 + 4,68 \cdot n - 0,021 \cdot n^2, \quad (29)$$

де K – кількість видалених частин цибулини, %; n – частота обертання барабана, хв⁻¹.

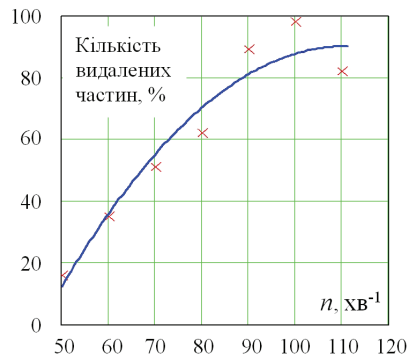


Рис. 12. Визначення оптимальної частоти обертання барабана за показником кількості видалених частин цибулини: × – експериментальні дослідження; — – кореляційна крива

Найявність характерного оптимуму частоти обертання $n=100$ хв⁻¹ безпосередньо впливає з теоретичної моделі процесу очищення. Згідно з цією моделлю, за великих частот обертання настає так званий третій неробочій режим барабана, коли шар цибулин притиснутий до внутрішньої поверхні барабана відцентровою силою і при якому зусилля на зрізання не виникають.

6. Обговорення результатів дослідження процесу механічного очищення цибулі ріпчастої

Результати досліджень комбінованого процесу очищення цибулі ріпчастої дозволяють визначити тривалість її попереднього проварювання, до стану який забезпечує максимальну ступінь очищення та мінімальний відсоток втрат сировини під час подальшої механічної обробки.

Отримані дані дозволяють стверджувати, що максимальне значення ступеня очищення цибулин складає 88...98 %, коефіцієнт заповнення об'єму робочого барабана складає 0,3...0,7.

В результаті регресійного аналізу залежності ступеня очищення від частоти обертання барабана визначено раціональне значення частоти його обертання за показником кількості видалених частин цибулини, яке відповідає 100 хв⁻¹. За більших частот обертання спостерігається притискання шару цибулин до внутрішньої поверхні барабана відцентровою силою і при цьому зусилля на зрізання не виникають.

На теперішній час математичне моделювання процесу механічної обробки цибулі ріпчастої з метою визначення раціональних параметрів комбінованого процесу очищення є новим дослідженням. Грунтуючись на підставі проведених теоретичних та експериментальних дослідженнях розроблено конструкцію апарата для комбінованого очищення цибулі та визначено раціональні режими його роботи. Це дозволить суттєво інтенсифікувати та механізувати процес очищення, забезпечить високу якість очищення продукту та мінімізує втрати сировини. Розроблений апарат для комбінованого очищення цибулі ріпчастої можливо застосовувати у закладах ресторанного господарства, заготівельних цехах та підприємствах харчової промисловості. В подальших дослідженнях планується провести проектні розрахунки конструкції апарата з метою її удосконалення, що надасть можливість вра-

хувати розміри цибулин та їх сортові особливості під час процесу очищення.

7. Висновки

1. Розроблено експериментальну установку із відповідною методикою, яка дозволяє проводити дослідження процесу механічного очищення цибулі ріпчастої та визначено залежність відсотку втрат силовини від параметрів процесу.

2. Результати досліджень дозволили встановити тривалість попереднього проварювання цибулі, до стану який забезпечує максимальну ступінь очищення. Так, при коефіцієнті завантаження 0,3 раціональна тривалість проварювання цибулі у барабані з отворами площею в межах $(3,07...4,84) \cdot 10^{-4}$ м² складає 140 с та відповідна раціональна тривалість проварювання у барабані для таких саме отворів за коефіцієнта завантаження 0,5 становить 170 с, а за коефіцієнта завантаження 0,7 – 180 с.

3. Встановлено, що максимальне значення ступеня очищення цибулин складає 88...98 %, при чому за невеликого коефіцієнта заповнення барабана (K_y) 0,3...0,5 спостерігаються два екстремуми в діапазоні товщини

провару: 4...4,5 мм для $K_y=0,3$ та 3,5...5 для $K_y=0,5$, а для коефіцієнта заповнення барабана 0,7 такий екстремум тільки один для $\delta=4,8$ мм. Таким чином, залежно від коефіцієнта заповнення максимум ступеня очищення спостерігається для отворів з більшою площею, але за різної глибини провару.

4. Запропоновано на якісному рівні математичну модель процесу обробки цибулі ріпчастої під час її механічного доочищення, яка теоретично обґрунтовує, що оптимальним режимом руху продукту у барабанному пристрої для очищення є режим, при якому шар цибулин втрачає рівноважний стан та з'являються сили ковзання відносно внутрішньої поверхні барабана, які разом із силою тертя визначають зусилля різання шийки та денця цибулини. Математична модель, знайдена методом регресійного аналізу, має похибку 5 % у межах значення коефіцієнта заповнення барабана $\beta=0,2...0,8$. Математична модель має вигляд системи нерівностей, яка характеризується критерієм Фруда. Пов'язує коефіцієнт заповнення барабана та центральний кут сегмента з продуктом.

Отримані рівняння для розрахунку граничних режимів руху при переміщенні у барабані, які в явному вигляді враховують коефіцієнт тертя, кут природного скошу шару продукту та величину завантаження барабана.

Література

1. Slavin, J. Health Benefits of Fruits and Vegetables [Text] / J. Slavin, B Lloyd // *Advances in Nutrition: An International Review Journal*. – 2012. – Vol. 3, Issue 4. – P. 506–516. doi: 10.3945/an.112.002154
2. Pieniak, Z. Subjective and objective knowledge as determinants of organic vegetables consumption [Text] / Z. Pieniak, J. Aertsens, W. Verbeke // *Food Quality and Preference*. – 2010. – Vol. 21, Issue 6. – P. 581–588. doi: 10.1016/j.foodqual.2010.03.004
3. Rico, D. Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review [Text] / D. Rico, A. Martin-Diana, J. Barat, C. Barry-Ryan // *Trends in Food Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, Issue 7. – P. 373–386. doi: 10.1016/j.tifs.2007.03.011
4. Miglio, C. Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables [Text] / C. Miglio, E. Chiavaro, A. Visconti, V. Fogliano, N. Pellegrini // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2008. – Vol. 56, Issue 1. – P. 139–147. doi: 10.1021/jf072304b
5. Rennie, C. Preferences for steaming of vegetables [Text] / C. Rennie, A. Wise // *Journal of Human Nutrition and Dietetics*. – 2010. – Vol. 23. – P. 108–110. doi: 10.1111/j.1365-277x.2009.01018.x
6. Lanzotti, V. The analysis of onion and garlic [Text] / V. Lanzotti // *Journal of Chromatography A*. – 2006. – Vol. 1112, Issue 1-2. – P. 3–22. doi: 10.1016/j.chroma.2005.12.016
7. Nemeth, K. Food content, processing, absorption and metabolism of onion flavonoids [Text] / K. Nemeth, M. Piskula // *Critical reviews in food science and nutrition*. – 2007. – Vol. 47, Issue 4. – P. 397–409. doi: 10.1080/10408390600846291
8. Antonia Murcia, M. Vegetables antioxidant losses during industrial processing and refrigerated storage [Text] / M. Antonia Murcia, A. Jimenez, M. Martinez-Tome // *Food Research International*. – 2009. – Vol. 42, Issue 8. – P. 1046–1052. doi: 10.1016/j.foodres.2009.04.012
9. Lin, D. Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables [Text] / D. Lin, Y. Zhao // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2007. – Vol. 6, Issue 3. – P. 60–75. doi: 10.1111/j.1541-4337.2007.00018.x
10. Caldwell, E. Perceived access to fruits and vegetables associated with increased consumption [Text] / E. Caldwell, M. Kobayashi, W. Dubow, S. Wytinck // *Public Health Nutrition*. – 2008. – Vol. 6, Issue 10. – P. 1743–1750. doi: 10.1017/s1368980008004308
11. Mota, C. Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation [Text] / C. Mota, C. Luciano, A. Dias, M. Barroca, R. Guine // *Food and Bioprocess Technology*. – 2010. – Vol. 88, Issue 2-3. – P. 115–123. doi: 10.1016/j.fbp.2009.09.004
12. Hanif, R. Use of vegetables as nutritional food: role in human health [Text] / R. Hanif, Z. Iqbal, M. Iqbal // *Journal of Agricultural and Biological Science*. – 2006. – Vol. 1, Issue 1. – P. 18–22.
13. Pereira, R. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing [Text] / R. Pereira, A. Vicente // *Food Research International*. – 2009. – Vol. 43, Issue 7. – P. 1936–1943. doi: 10.1016/j.foodres.2009.09.013
14. Kim, J. C. Firmness of thermal processed onion as affected by blanching [Text] / J. C. Kim // *Journal of Food Processing and Preservation*. – 2006. – Vol. 30, Issue 6. – P. 659–669. doi: 10.1111/j.1745-4549.2006.00096.x

15. Roldán-Marín, E. Onion high-pressure processing: Flavonol content and antioxidant activity [Text] / E. Roldán-Marín, C. Sánchez-Moreno, R. Lloría, B. de Ancos, M. P. Cano // LWT – Food Science and Technology. – 2009. – Vol. 42, Issue 4. – P. 835–841. doi: 10.1016/j.lwt.2008.11.013
16. Siti Mazli, M. Design and Development of an Apparatus for Grating and Peeling Fruits and Vegetables [Text] / M. Siti Mazli, A. Nur Aliaa, H. Nor Hidayati, M. Intan Shaidatul, W. Wan Zuha // American Journal of Food Technology. – 2010. Vol. 5, Issue 6. – P. 385–393. doi: 10.3923/ajft.2010.385.393
17. Deynichenko, G. Stabilization of quality cleaning onion innovative way [Text] / G. Deynichenko, O. Tereshkin, D. Gorelkov, D. Dmitrevskiy // Recent Journal. – 2013. – Vol. 14, Issue 4 (40). – P. 246–250.
18. Пат. 106813 Україна: МПК А23N 15/08. Апарат для очищення цибулі ріпчастої [Текст] / Дейниченко Г. В., Терешкін О. Г., Горелков Д. В., Дмитревський Д. В. – заявник і патентовласник Харківський державний університет харчування та торгівлі. – № а201301919; заявл. 18.02.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. – 6 с.
19. Tereshkin, O. The study of influence of the process of mechanical additional cleaning on the surface onion layer at combined process of cleaning [Text] / O. Tereshkin, D. Horielkov, D. Dmytrevskiy, V. Chervonyi // EUREKA: Life Sciences. – 2016. – Vol. 6. – P. 24–30. doi: 10.21303/2504-5695.2016.00239

