

УДК 631.365.4

С.В. Міненко

Житомирський національний агроекологічний університет

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТОВИХ ЧАСТОК В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Проаналізовано умови руйнування твердих грудкових утворень у киплячому шарі на сепаруючих робочих органах картоплезбиральних машин. Запропоновано методику визначення зони киплячого шару при сепаруванні ґрунту на пруткових елеваторах картоплезбиральних машин.

Постановка проблеми

Якісне протікання технологічного процесу сепарації картопляного вороху на всіх видах сепаруючих пристроїв значною мірою залежить від наявних у воросі твердих грудкових утворень. Цей процес ускладнюється великою твердістю грудок, однаковими розмірами з бульбами та схильністю картоплі до травмування при контакті з робочими органами машини.

Аналіз основних досліджень та публікацій

В даний час роботи з вирішення цієї проблеми ведуться в двох напрямках: руйнування грудок механічними способами, що дозволяє їх відокремити на сепараторах просіюючого типу, а також створення автоматичних пристроїв, які відділяють тверді грудкові утворення за фізико-механічними властивостями [1, 2, 3].

В сучасних картоплезбиральних машинах застосовують три основні методи руйнування грудок: попереднє руйнування в гребнях, перед початком викопування, шляхом прикочування різними видами котків (рис. 1); руйнування грудкових утворень статичним стисненням за допомогою гумових балонів у середині технологічного процесу сепарації (рис. 2), а також метод динамічного руйнування, шляхом дії на грудку робочого органу [3, 4].

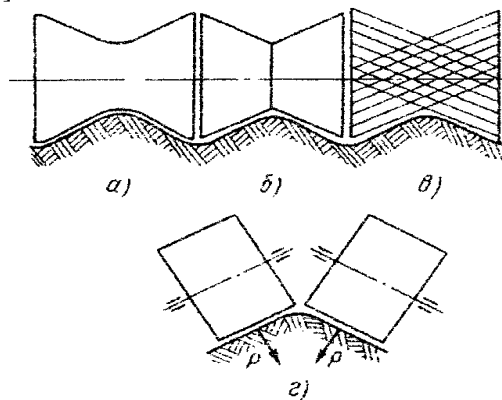


Рис. 1. Типи котків для руйнування грудок у гребнях:

а – ввігнутий; б – з двох зрізаних конусів; в – прутковий; г – оприсовувальні

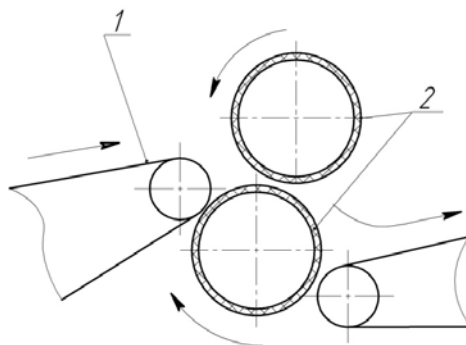


Рис. 2. Циліндричні вальцеві гумові барабани

Перші два способи сприяють руйнуванню тільки неміцних грудкових утворень, а в деяких випадках створюють зворотній ефект, особливо при підвищеній вологості на тяжких ґрунтах.

Третій спосіб найбільш дієвий, але використання його досить обмежене, що пов'язано з пошкодженням бульб, які мають допустиме зусилля співудару до 0,25 кН, а необхідне зусилля для руйнування грудок іноді досягає 0,35 кН, тому даний вид руйнування доцільно застосовувати на початку технологічного процесу сепарації, де спостерігається ефект «ґрунтової подушки» і удар по бульбі не такий відчутний [1, 2].

Мета і методика досліджень

Метою дослідження є створення математичних основ розрахунку руйнування твердих грудкових утворень в киплячому шарі ґрунту на прутковому елеваторі картоплезбиральної машини, а також визначення геометричних розмірів зони киплячого шару, що дасть змогу більш повно керувати процесом сепарування картопляного вороху.

Теоретичне обґрунтування площі поперечного перерізу гребенів здійснювалося із застосуванням елементів вищої математики та диференціального числення.

Завдання досліджень

Розробити методику для визначення математичних основ розрахунку руйнування твердих грудкових утворень в киплячому шарі ґрунту та визначення геометричних розмірів даної зони на прутковому елеваторі картоплезбиральної машини.

Результати досліджень

Розглянемо ґрунтову частку у вигляді гранули з ефективним радіусом R_0 і масою m_0 . Фронтальна поверхня частки, яка «стирається» в процесі руху в середовищі собі подібних, не дозволяє нехтувати втратою маси

частки в процесі її руху. Запишемо динамічне рівняння руху частки в силовому полі з напруженням \bar{g} :

$$\frac{d(m\bar{V})}{dt} = \bar{P} + \bar{F}_\delta + \bar{F}, \quad (1)$$

де \bar{V} – швидкість руху частки в середовищі; \bar{P} – вага частки; \bar{F}_δ – сила тертя частки в середовищі; \bar{F} – сила тиску на частку з боку шару, який знаходиться над часткою.

Зрозуміло, що сила тертя повинна бути складною функцією від швидкості, але наявність пилової фракції між частками, що взаємодіють, і відносно невеликі швидкості дозволяють лінеаризувати цю залежність (прийняти закон Стокса):

$$\bar{F}_m = \sum_{i=1}^n \beta_i |\bar{V}|^i \frac{\bar{V}}{|\bar{V}|} \approx \beta \bar{V}, \quad (2)$$

де β – коефіцієнт пропорційності, наприклад, для сферичної гранули $\beta = 6\pi\eta R$, η – коефіцієнт динамічної в'язкості, \bar{F} – сила тиску (статичного):

$$\bar{F} = \rho(H - P\bar{g}r)\bar{g}, \quad (3)$$

де ρ – середня густина шару ґрунту; у зв'язку з невеликою товщиною шару барометричною залежністю густини від висоти можна нехтувати [5]. Зовнішня збуджуюча сила може бути подана як сума імпульсів:

$$\bar{F}_3 = \bar{F}_{30} \sum_{j=1}^N \delta(t - t_j). \quad (4)$$

Проектуємо рівняння (1) на координатну вісь Ox (рис. 3):

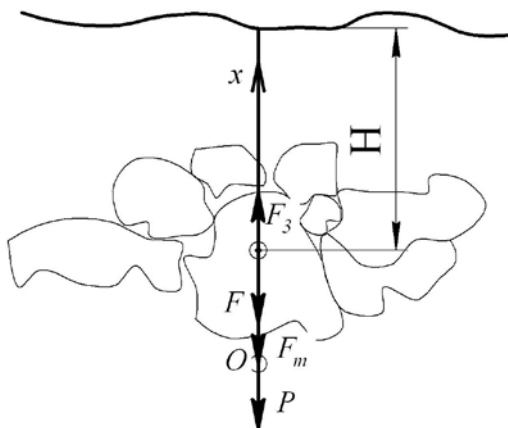


Рис. 3. Розрахункова схема для вивчення динаміки ґрунтового агрегату в киплячому шарі

$$\frac{d(mV)}{dt} = -mg - \beta V - \rho(H-x)Sg + F_{30} \sum_{j=1}^N \delta(t-t_j), \quad (5)$$

де $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака [7], S – площа поперечного (діаметрального) перетину частки, ρ – середня густина шару ґрунту над часткою, N – кількість ударів за час взаємодії. Слід зазначити, що рівняння (5) являє собою різновид рівняння Мещерського [6] для реактивного руху. Після незначних перетворень рівняння (5) можна записати в такому вигляді:

$$\ddot{x} + \frac{\mu + \beta}{m} \dot{x} - \gamma x = \frac{F_{30}}{m} \sum_{j=1}^N \delta(t-t_j) - g \left(1 + \frac{\rho SH}{m} \right), \quad (6)$$

$$\dot{x} = V; \quad \mu = \frac{dm}{dt}; \quad \gamma = \frac{\rho SH}{m}.$$

В загальному випадку більшість параметрів отриманого рівняння (6) є функціями часу і рівняння, будучи лінійними, є досить складними для аналізу. Вважаючи, що зміна маси частки відбувається завдяки двом механізмам – втраті мікрочасток з поверхні ґрунту і отриманню пилової фракції з вищих шарів, можна зробити висновок, що μ не залежить від часу, тобто $\mu = const$. Слід зазначити, що експериментальні дослідження вище сказаного не проводились і висновки мають значною мірою феноменологічний характер. Легко побачити, що вище сформульоване наближення приводить до лінійної в часі зміни маси $m(t) = m_o - \mu t$. Крім того, в киплячому шарі окремі гранули в основному зберігаються, тобто можна записати таким чином:

$$m_o \gg \mu \tau \Rightarrow \mu \ll \frac{m_o}{\tau}, \quad (7)$$

де τ – час взаємодії робочого органу з гранулами ґрунту.

Зрозуміло, що $\rho \leq \rho_{\omega}$ (ρ – густина шару над часткою, ρ_{ω} – густина частки), тому можна прийняти $\rho \approx \rho_{\omega}$. Отримуємо:

$$\ddot{x} + \frac{\mu + \beta}{m_o - \mu t} \dot{x} - \lambda x = \frac{F_{30}}{m_o - \mu t} \sum_{j=1}^N \delta(t-t_j) - g \left(1 + \frac{H}{g} \lambda \right), \quad (8)$$

$$\lambda = \left(\frac{4}{3\pi} \right)^{2/3} \rho^{1/3} g (m_o - \mu t)^{-1/3}.$$

Використовуючи наближення (7) до виду, зручного для методу послідовних наближень, отримаємо:

$$\ddot{x} + \frac{\mu + \beta}{m_o} \dot{x} - \lambda_o x = \hat{O}(t)$$

$$\lambda_o = \left(\frac{4}{3\pi} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho}{m_o} \right)^{1/3} g;$$

$$\Phi(t) = \frac{F_{30}}{m_o} \left(1 + \frac{\mu t}{m_o} \right) \sum_{j=1}^N \delta(t - t_j) - g \left[1 + \lambda_0 \left(1 + \frac{\mu t}{3m_o} \right) \right] - \frac{\mu(\mu + \beta)t}{m_o^2} \dot{x} + \lambda_0 \frac{\mu t}{3m_o} x = \Phi_o(t) + \Phi_1(x, \dot{x}, t) \quad (9)$$

За допомогою нульової ітерації можна розв'язати однорідне рівняння з початковими умовами: $x_o(0) = R$, $\dot{x}_o(0) = V_0$:

$$\left. \begin{aligned} x_o(t) &= \frac{k_2 R - V_0}{k_2 - k_1} \cdot e^{k_1 t} + \frac{V_0 - k_1 R}{k_2 - k_1} \cdot e^{k_2 t}, \\ k_{1,2} &= \pm \frac{\mu + \beta}{m_o} \pm \sqrt{\frac{(\mu + \beta)^2}{m_o} + \lambda_0}, \\ \dot{x}_o(t) &= \frac{k_1(k_2 R - V_0)}{k_2 - k_1} \cdot e^{k_1 t} + \frac{k_2(V_0 - k_1 R)}{k_2 - k_1} \cdot e^{k_2 t}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Частковий розв'язок може бути записаний у такому вигляді:

$$x_{o\pm}(t) = -e^{k_1 t} \int_0^t \frac{\hat{O}_i(t_1) e^{k_2 t_1}}{W(t_1)} dt_1 + e^{k_2 t} \int_0^t \frac{\hat{O}_i(t_1) e^{k_1 t_1}}{W(t_1)} dt, \quad (11)$$

де $W(t)$ – бросіан лінійного рівняння (9).

$$W(t) = k_2 - k_1 = -2 \sqrt{\frac{(\mu + \beta)^2}{m_o^2} + \lambda_0}. \quad (12)$$

З виразу (9) видно, що вираз (11) легко обчислюється.

Запишемо ітераційну схему (перше наближення):

$$\ddot{x}_1 + \frac{\mu + \beta}{m_o} \dot{x}_1 - \lambda_0 x_1 = \hat{O}_0 + \hat{O}_1(x_0 + x_{20}, \dot{x}_0 + \dot{x}_{20}, t). \quad (13)$$

Алгоритм знаходження розв'язку (12) попередній. Збіжність процесу визначається умовою (7). Порушення цієї умови можливе для безструктурних ґрунтів (або для ґрунтів з низькою водостійкістю [5]).

Слід відзначити, що вже нульове наближення дає можливість розглядати цілий ряд проблем. Так, наприклад, умова $\dot{x}(t_0) = 0$ дає можливість визначити ширину зони киплячого шару (при вибраних вище початкових умовах):

$$l_\phi = x_0(t_0) = \frac{k_2 R - V_0}{k_2 - k_1} \left(\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{V_0 - k_1 R}{V_0 - k_2 R} \right)^{k_1/k_2 - k_1} - \frac{k_1 R - V_0}{k_2 - k_1} \left(\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{V_0 - k_1 R}{V_0 - k_2 R} \right)^{k_2/k_2 - k_1}. \quad (14)$$

Аналіз та інтерпретація отриманого виразу можуть бути проведені після отримання результатів відповідних експериментальних досліджень.

Слід також відзначити, що рівняння (8) допускає точний розв'язок – після відносно нескладних перетворень можна отримати гіпергеометричне рівняння [7], що, як розв'язок, дає модифіковані функції Бесселя.

Висновки

Проведений аналіз дає змогу встановити основні закономірності протікання процесу руйнування твердих грудкових утворень у киплячому шарі ґрунту на прутковому елеваторі картоплезбиральної машини. Виведено залежність для визначення зони киплячого шару, що дасть змогу уточнювати геометричні та конструктивні розміри сепаруючих пристроїв картоплезбиральних машин.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження слід зосередити на вивченні питання покращення та пошуку нових більш досконалих методик для визначення зони киплячого шару та зосередити увагу на практичних дослідженнях, що дадуть змогу розробляти більш досконалі робочі органи картоплезбиральної техніки.

Література

1. *Петров Г.Д.* Картофелеуборочные машины / *Г.Д. Петров.* – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.
2. *Мацепуро М.Е.* Технологические основы механизации уборки картофеля / *М.Е. Мацепуро.* – Минск: Гос. изд-во, 1969. – 301 с.
3. Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарської техніки / *В.В. Адамчук, Г.Л. Баранов, О.С. Барановський* [та ін.] / – К.: Агр. наука, 2004. – 394 с.
4. *Сисолін П.В.* Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: у 2-х кн. / *П.В. Сисолін, Т.І. Рибак, В.М. Сало*; за ред. М.І. Чорновола / *Машини для рільництва.* 2 кн. – К.: Урожай, 2002. – 364 с.
5. *Основы агрофизики* / *П.В. Вершинин, М.К. Мельникова, Б.Н. Мичурин* [и др.], под ред. Иоффе]. – М.: Гос. изд-во физ-мат. лит-ры, 1959. – 904 с.
6. *Яблонский А.А.* Курс теоретической механики / *А.А. Яблонский* – М.: Наука, 1971. – Ч. 1. – 484 с.
7. *Янке Е.* Специальные функции (формулы, графики, таблицы) / *Е. Янке, Ф. Эдме, Ф. Леш.* – М.: Наука, 1968. – 480 с.
8. *Андреев О.А.* Моделювання процесів сепарації двохфазних сипучих речовин / *О.А. Андреев, В.І. Луганець* // Комп'ютерне моделювання: матеріали міжнар. наук. конф. – Дніпродзержинськ, – 2000. – С. 61–63.