

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕЧІЇ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ ВПОДОВЖ ЛОТКА САМОСКИДНОГО БУНКЕРА КОМБАЙНА У МЕЖАХ В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Ловейкін В.С., д.т.н., проф., Човнюк Ю.В., к.т.н., доц.,
Шимко Л.С., к.т.н., доц.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведений динамічний аналіз руху зерна вповдовж лотка самоскидного бункера комбайна у межах в'язко-пластичної моделі. На основі варіаційних методів розроблена методика визначення форми вивантажувального лотка, яка забезпечує мінімально допустимий час вивантаження зерна з самоскидного бункера комбайна без втрат.

Постановка задачі. Розрахунок та вибір раціональних режимів руху зерна зі самоскидного бункера комбайна призводить до зменшення пошкодження зерна та підвищення продуктивності збирання зернових в цілому. Існують досить розвинені математичні моделі, які описують рух окремої зернини без врахування впливу на неї сусідніх зернин. Обчислені за такою теорією кінематичні характеристики потоку суміші можуть значно відрізнятись від тих, що мають місце у реальних умовах вивантаження зерна зі самоскидного бункера. Тому розробка уточнених математичних моделей руху зерна вздовж лотка самоскидного бункера, у межах в'язко-пластичної моделі, відноситься до актуальних задач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що дослідження кінематичних та динамічних параметрів, а також режимів роботи самоскидного бункера збиральних комбайнів були проведені у роботах [1-2], що присвячені проблемам оптимізації параметрів і режимів роботи самоскидних бункерів зернозбиральних комбайнів при вивантаженні зерна у межах моделей квазірідини (для зернового матеріалу).

Робота [3] присвячена новому напрямку у механіці гранульованих середовищ – так званій «теорії швидких рухів». У цій теорії досліджується течія зернистих середовищ, котра зазвичай реалізується у гравітаційних потоках (рух зерна у елеваторах) і відрізняється відносно великими (порядку метрів у секунду) швидкостями часточок. Виявляється, що поведінка матеріалів за такого типу течії схожа на поведінку в'язкої рідини у аналогічних умовах і принципово відрізняється від передбачень теорії, заснованих на класичних підходах Кулона.

Задача в'язко-пластичної деформації зернової суміші у інженерній практиці малодосліджена. Це пояснюється відсутністю достовірної інформації щодо величин граничного напруження зсуву і в'язкості вказаної суміші. Динамічний аналіз руху зерна при вивантаженні з самоскидного бункера зернозбирального комбайна під дією зсуву, у межах в'язко-пластичної моделі,

було б особливо корисним при проектуванні та конструюванні вивантажувальних пристроїв і механізмів, що призначені для переміщення сипких тіл, при виконанні технологічних процесів виробництва сільськогосподарської продукції.

Мета досліджень полягає в дослідженні руху зерна в межах в'язко-пластичної моделі вздовж лотка самоскидного бункера та розробці методики визначення форми вивантажувального лотка самоскидного бункера зернозбирального комбайна, що забезпечить мінімально допустимий час вивантаження зерна без втрат.

Результати досліджень. Розглянемо рух зернової суміші вповодж лотка самоскидного бункера. Реологічне рівняння стану зернової суміші [3-4] має вид:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{d\theta}{dz}, \quad (1)$$

де τ – напруження зсуву у суміші; η – її динамічна в'язкість; τ_0 – граничне напруження зсуву; \mathcal{G} – швидкість зернової суміші. Критична висота $z_{кр}$, вище котрої суміш буде вести себе як тверде тіло, зв'язана з граничним напруженням зсуву τ_0 . Якщо $\tau \leq \tau_0$ – рух відсутній. Приймаючи для суміші коефіцієнт, що характеризує внутрішнє тертя, рівним $\frac{1}{2}$ (за Сен-Венаном) [3], отримаємо вираз, який визначає умову зсуву:

$$h_{кр} = \frac{2\tau_0}{\rho g \sin 2\alpha} \quad (2)$$

де ρ – щільність суміші.

Розглянемо рух у випадку, якщо зсув відбувається.

Будемо вважати, що на границях суміші з нижньою площиною (стілкою бункера) існує повне зчеплення, можна знехтувати відцентровою силою і прискоренням Коріоліса як і у [1-2]. Для в'язкого середовища рівняння руху в нашому випадку має вид: (Взяті з рівняння Нав'є – Стокса)

$$\rho g \sin 2\alpha + \eta \cdot \left(\frac{d^2\theta}{dy^2} + \frac{d^2\theta}{dz^2} \right) = 0 \quad (3)$$

Інтегруючи рівняння (3) відносно z , отримаємо:

$$\eta \frac{d\theta}{dz} = -\rho g z \sin 2\alpha + C_1 \quad (4)$$

$$\eta \cdot \mathcal{G}_z = -\rho g \frac{z^2}{2} \sin \alpha + zC_1 + C_2 \quad (5)$$

де C_1, C_2 – невизначені константи

Фактично рівняння (3) є частковим випадком рівняння Нав'є – Стокса. Подальше їх інтегрування призводить до наступних значень напруження зсуву:

$$\tau = -\rho g z \cdot \sin \alpha + C_1. \quad (6)$$

При $z = 0; \cdot \mathcal{G}_z = 0; C_2 = 0$, а при $z = z_{кр}; \cdot \mathcal{G}_z = 0$ і:

$$C_1 = \rho g \frac{z_{кр}}{2} \sin \alpha. \quad (7)$$

Тоді:

$$\tau = \rho g \left(\frac{z_{кр} \cdot z}{2} - z \right) \sin \alpha. \quad (8)$$

Знаючи залежність для τ (типу (8)), визначимо характеристики зернової суміші з урахуванням пластичності. Треба використати рівняння (1). При переході до в'язко-пластичної моделі зернової суміші введемо у (6) τ_0 . Проінтегрувавши це рівняння отримаємо:

$$\eta \cdot \mathcal{G} = \rho g \left(\frac{z_{кр} \cdot z}{2} - \frac{z^2}{2} \right) - \tau_0 \cdot z + C_3. \quad (9)$$

Диференціальне рівняння (6) треба проінтегрувати з урахуванням пластичних властивостей. Знаючи, що $z_{кр}$ (товщина шару зернового матеріалу, вище якого починається зсув зерна), $z_{кр} = H - H_{кр}$. Де C_3 – невизначена константа інтегрування; H – поточна висота завантаженого самоскидного бункера, $H_{кр}$ критична висота завантаженого самоскидного бункера:

$$\mathcal{G} = \frac{\rho g \cdot \sin \alpha}{2\eta} \left(H - \frac{2\tau_0}{\rho g \cdot \sin \alpha} - z \right) \cdot z - \frac{\tau_0 z}{\eta}. \quad (10)$$

Середня швидкість потоку зернового матеріалу, що вивантажується із самоскидного бункера, визначається стандартним шляхом:

$$\mathcal{G}_{сер} = \frac{\int_0^{z_{кр}} \theta d_z}{z_{кр}} = \frac{\rho g \cdot \sin \alpha}{2\eta} (H - H_{кр}) \cdot \left[\frac{H - H_{кр}}{6} - \frac{\tau_0}{\rho g \cdot \sin \alpha} \right]. \quad (11)$$

Отримані значення середньої швидкості дозволяють наближено визначити при відомих τ_0 та η величини максимальних деформацій зернового матеріалу (зерна) у часі. Однак фактична деформація буде меншою, оскільки відповідає $\mathcal{G}_{сер}$ початку течії. З часом, цей процес затухає, оскільки зменшуються діючі сили й збільшується τ_0 та η , наприклад, за рахунок зачеплення зі стінками самоскидного бункера (злипання).

Середня швидкість зернового матеріалу, що вивантажується із самоскидного бункера, $\mathcal{G}_{сер}$ буде завжди більше нуля за умови, що член виразу

$$(11) \left[\frac{H - H_{кр}}{6} - \frac{\tau_0}{\rho g \cdot \sin \alpha} \right] > 0; \text{ тобто,}$$

$$\sin \alpha > \frac{6\tau_0}{\rho g \cdot (H - H_{кр})}. \quad (12)$$

Висота шару зернової суміші у лотку самоскидного бункера, за якої $\mathcal{G}_{сер} > 0$ тобто, зерновий матеріал вивантажується:

$$H > H_{кр} + \frac{6\tau_0}{\rho g \cdot \sin \alpha}. \quad (13)$$

Враховуючи (2), замість (13) маємо:

$$H > \frac{2\tau_0}{\rho g \cdot \sin 2\alpha} + \frac{6\tau_0}{\rho g \cdot \sin \alpha} = \frac{\tau_0(1 + 6 \cos \alpha)}{\rho g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}, \quad (14)$$

$$H = H_{\min} = \frac{2\tau_0}{\rho g} \cdot \left(1 + \frac{6}{\sqrt{2}}\right). \quad (15)$$

Аналіз (15) показує, що у інтервалі $0 < \alpha < 45^\circ$ величина H спадає до найменшого значення. На проміжку $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ величина H зростає від H_{\min} до нескінченності (рис.1).

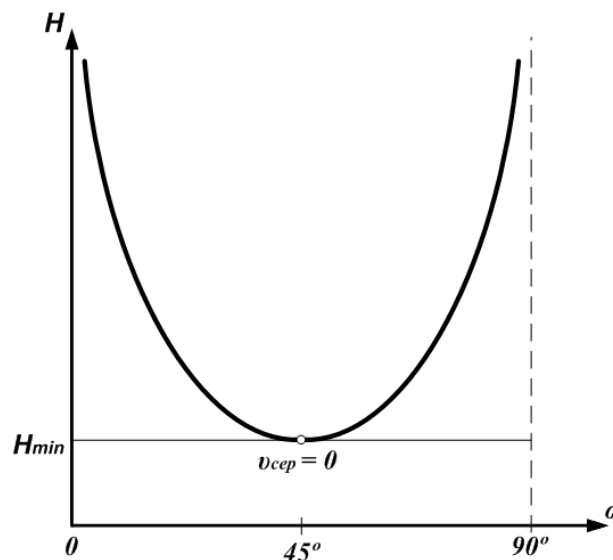


Рис. 1 – Залежність $H(\alpha)$ у межах в'язко-пластичної моделі середовища (зерна), за якої відбувається зсув (рух) зернової суміші по лотку самоскидного бункера.

Можна вважати рис. 1 діаграмою, яка визначає режими руху в'язко-пластичної зернової суміші з лотка самоскидного бункера.

Ширина випускного отвору – b , лотка самоскидного бункера збиральної машини чи комбайна (рис. 2), визначає умови нормального витікання суміші з нього, тобто без втрат. Для зв'язаної зернової суміші відома умова витікання

забезпечується, якщо радіус дуги (периметра) частини лотка, що контактує (обтікає) з зерном, – R_B більший від відносного радіуса отвору, через який зерновий матеріал почне пересипатися за край лотка – $R_{скл}$ або сумісний з ним, тобто виконується умова коли $R_B \gg R_{скл}$ [4]:

$$R_{скл} = \frac{\tau_0(1 + \sin \varphi)}{\rho g}, \quad (16)$$

де: φ – кут внутрішнього тертя. Якщо бункер нахилений під кутом α до горизонталі, тоді у формулі (16) слід здійснити заміну $g \rightarrow g \cdot \sin \alpha$; відтак,

$$R_{скл} = \frac{\tau_0(1 + \sin \varphi)}{\rho g \sin \alpha} \quad (17)$$

$$R_B = \frac{a \cdot b}{2(a + b)} \quad (18)$$

де: b – ширина випускного отвору (рис. 2).

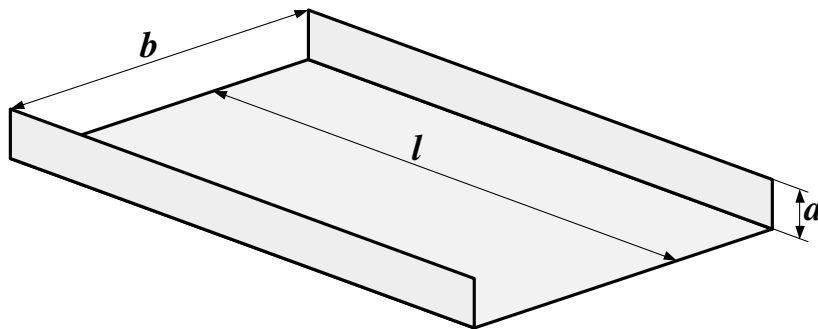


Рис. 2 – Схема кришки-лотка самоскидного бункера, через який витікає зернова суміш

Розглянемо умови рівності наведених виразів (17) і (18):

$$\frac{\tau_0(1 + \sin \varphi)}{\rho g \sin \alpha} = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}, \quad (19)$$

за заданого b , одержимо розрахункову формулу висоти бортів кришки-лотка самоскидного бункера:

$$a = \frac{\tau_0 \cdot b \cdot k \cdot (1 + \sin \varphi)}{b \cdot \rho \cdot g \sin \alpha - 2\tau_0(1 + \sin \varphi)} \quad (20)$$

де k – коефіцієнт запасу ($k > 2$);

тоді як

$$\tau_0 \cdot b \cdot l = mg \sin \alpha, \quad (21)$$

звідки:

$$\tau_0 = \frac{mg \sin \alpha}{b \cdot l}, \quad (22)$$

На рисунках 3 і 4 відображені, відповідно, розрахункові залежності конструктивних параметрів, а саме, висоти бортів кришки-лотка – a та ширини лотка – b самоскидного бункера збиральної машини чи комбайна від φ – кута природного ухилу зернового матеріалу певної сільськогосподарської культури при різних значеннях об'ємної маси зерна – ρ , тобто, теоретично досліджена висота шару зернової суміші у лотку, за якої $Q_{сер} > 0$ тобто, зерновий матеріал вільно вивантажується.

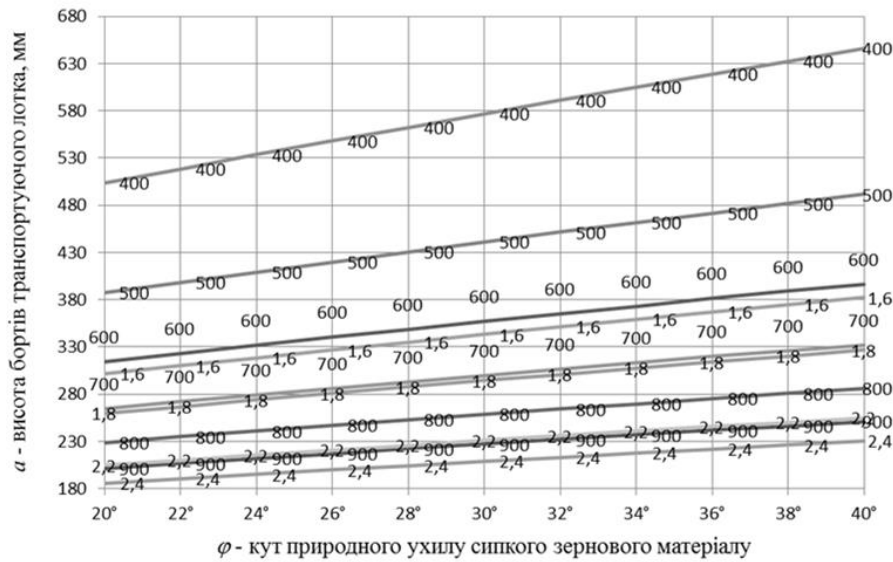


Рис. 3 – Графік залежності висоти бортів кришки-лотка – a від φ – кута природного ухилу сипкого матеріалу при різних значеннях об'ємної маси матеріалу – ρ та ширини лотка – b .

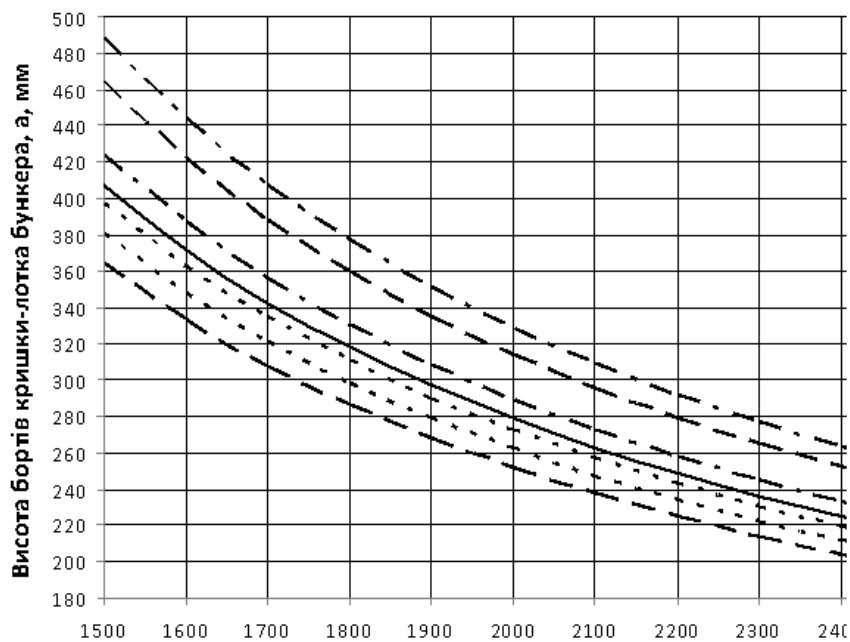


Рис. 4 – Графік залежності висоти бортів кришки-лотка – a від ширини лотка – b із врахуванням механіко-технологічних властивостей зернового матеріалу основних сільськогосподарських культур.

Як видно з побудованих графіків (рис. 4), висота бортів кришки-лотка самоскидного бункера має пряму (на даному діапазоні значень φ , майже лінійну) залежність від кута природного ухилу сипкого зернового матеріалу сільськогосподарських культур та зворотну від об'ємної маси та ширини транспортуючого лотка.

Висновки

1. Проведений динамічний аналіз руху зерна та розроблена математична модель руху зерна як в'язко-пластичної квазірідини. Визначено середню швидкість потоку зерна, що вивантажується із самоскидного бункера зернозбирального комбайна. Знайдено висоту шару зерна у лотку бункера, за якої при $\vartheta_{сер} > 0$ зерно вивантажується.

2. На основі варіаційних методів визначена форма вивантажувального лотка, яка забезпечує швидкий і рівномірний сплив зерна з урахуванням сил тертя по шорсткій поверхні, а також при дії парусності зернової суміші. Встановлено, що парусність спричиняє незначний вплив і нею можна знехтувати. Отже, конструктивні параметри похилого лотка: ширина 2,1м, довжина 2,7м та висота бортів 0,4м.

Список використаних джерел

1. Обґрунтування параметрів і режимів роботи вивантажувальних пристроїв комбайнів: [монографія] / В.С. Ловейкін, В.І. Недовесов, Ю.В. Човнюк, Л.С. Шимко. – К. «Компрінт», 2012. – 251 с.
2. Ловейкін В.С. Оптимізація режимів роботи самоскидного бункера зернозбирального комбайна. / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, Л.С. Шимко // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 123. «Механізація сільського господарства». – Т. I. – С. 211–217.
3. Смольский Б.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно-вязкопластичных материалов / Смольский Б.М., Шульман З.П., Гориславцев В.М. – Минск: Наука и техника, 1970, - 448 с.
4. Ландау Л.Д. Теоретическая физика; изд. 4-е, / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука, 1988. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.

Аннотация

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА ВДОЛЬ ЛОТКА САМОСВАЛЬНОГО БУНКЕРА КОМБАЙНА В ПРЕДЕЛАХ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Ловейкин В., Човнюк Ю., Шимко Л.

Проведенный динамический анализ движения зерна вдоль лотка самосвального бункера комбайна в пределах вязко-пластической модели. На

основе вариационных методов разработана методика определения формы выгрузного лотка, которая обеспечивает минимально допустимое время выгрузки зерна из самосвального бункера комбайна без потерь.

Abstract

DYNAMIC ANALYSIS OF GRAIN MATERIAL FLOWING ALONG A TRAY OF A HARVESTER TIPPER WITHIN THE VISCO-PLASTIC MODEL.

V. Loveykin, Y. Chovnyuk, L. Shymko

The dynamic analysis of the motion along the grain silo tipper tray combine within the visco-plastic model. Based on variational methods developed methods of measuring shape of unloading tray, which provides the minimum time allowed unloading of grain from the combine hopper tipper lossless.