



УДК 631.3:51

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-6

**ОБЧИСЛЕННЯ РОБОТИ В ОДНІЙ ПРИКЛАДНІЙ ТЕХНІЧНІЙ ЗАДАЧІ З РІЗНОЮ
ГЕОМЕТРІЄЮ РОЗТАШУВАННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Дубчак Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
Пришляк Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Viktor Dubchak, Ph.D., Associate Professor
Viktor Pryshliak, Ph.D., Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University

В статті розглянуто алгоритми побудови еквівалентних моделей заповнення резервуарів сільськогосподарської техніки рідинами, такими як паливо-мастильними матеріалами, ядохімікатами, органічними добривами та іншими твердими сипкими речовинами, динаміку руху котрих (силу опору, роботу, потужність) можна прирівняти до руху рідин.

Зростаючі вимоги у конкурентному ринковому середовищі обумовлюють необхідність постійного вдосконалення та обґрунтування оптимальних параметрів і форм резервуарів для перевезення матеріалів, які забезпечують виробниче функціонування складних технічних систем. У статті представлено різноманіття можливих технічних рішень резервуарів (ємностей) для зберігання та перевезення рідинних матеріалів по поверхні поля з різною змінною крутістю.

Розроблено теоретичні засади практичного спрямування руху сільськогосподарських матеріалів у повітряному та рідинних середовищах за умови дії гравітаційного поля. Проаналізовано технічні особливості робочих органів і систем для внесення рідких матеріалів залежно від потреб (зміни твердості ґрунту, крутизни схилів, швидкості руху агрегату). Інноваційний розвиток конкурентоспроможних агропромислових технологій і сільськогосподарської техніки можливий тільки із залученням потужного фізико-математичного апарату, що інколи є проблемним через нестачу фундаментальних теоретичних знань у проектувальників, конструкторів та студентів агроінженерного спрямування.

У результаті проведення досліджень з використанням фундаментального аналітико-математичного апарату розроблено алгоритмічні моделі, що описують рух рідин (мінеральних добрив) на їх переміщення. Такі процеси й явища відбуваються під час виробничого функціонування сільськогосподарських машин з резервуарами для переміщення рідких матеріалів (добрив), тощо.

Застосування апарату математичного аналізу та розрахунку технологічних процесів і технічних систем забезпечує створення необхідних умов для ефективного подачі рідинних матеріалів, внесення добрив, що важливо в системах точного землеробства. Окрім того, запропоновані інноваційні методи теоретичного аналізу та синтезу процесів, явищ, характерних для агропромислового виробництва, можуть ефективно й якісно застосовуватись у навчальному процесі під час підготовки агроінженерів до проектної професійної діяльності.

Ключові слова: теорія, практика, резервуар, числові характеристики, обчислення роботи, рух рідин, сільськогосподарські матеріали.

Ф. 39. Рис. 6. Літ. 14.

1. Постановка проблеми

Вітчизняними та зарубіжними вченими, які останнім часом активно досліджуються та розробляються конструктивні схеми робочих органів (резервуарів) для технічних засобів механізації агропромислової галузі, розроблено та науково обґрунтовано низку технічних рішень, технологічних процесів і технічних засобів систем точного та інтенсивного землеробства, у тому числі резервуарів для рідких органічних і мінеральних добрив, засобів хімічного захисту рослин. Кожна технологія направлена на отримання максимального прибутку від агропромислового виробництва завдяки зниженню собівартості виробленої продукції та підвищенню її якості, збільшенню урожайності, збереженню родючості ґрунтів. До основних факторів, які визначають урожайність сільськогосподарських культур, якість у тому продукції, конкурентоспроможність виробництва, відносяться технологічні операції зі зрошення полів, внесення добрив, хімічного захисту рослин. Виконання більшості операцій забезпечено сучасними технічними засобами механізації, котрі



спроєктовані та розроблені на засадах потужного математичного апарату як фундаментальної основи теоретичних досліджень.

Отже, наукоємне дослідження руху сільськогосподарських матеріалів у рідинних і повітряних середовищах за умови дії гравітаційного поля є актуальною проблемою, котра потребує теоретичного та практичного розв'язання. Удосконалення існуючих сільськогосподарських технологій і машин для забезпечення виконання операцій систем точного землеробства дозволить більше ніж у два рази зменшити собівартість виробленої продукції, а завдяки створенню оптимальних умов росту та розвитку рослин підвищити урожайність на 10–15%, що підтверджує актуальність даних наукових досліджень.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розв'язуванню проблемних питань руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному та повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля присвячена низка відомих наукових праць вчених, науково-технічних працівників Китаю [1], Японії, Ізраїлю, Німеччини, США, України та інших країн світу.

Інноваційний розвиток технологічних процесів, яким притаманний рух матеріалів під дією гравітаційного поля, має практичне застосування у новітніх конструкціях сільськогосподарських (машинах для сівби та садіння, внесення добрив, зернозбиральних комбайнах, машинах для післязбирального обробітку зерна тощо) і меліоративних машин (перш за все у дощувальних установках).

Ефективне конкурентоспроможне проектування технологічних процесів і конструювання машин на етапі розробки теоретичних передумов до оптимізації параметрів процесу руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному чи повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля забезпечується залученням фундаментального аналітико-математичного апарату, представленого, наприклад, в [2, 3]. Так в [2] подано метод виключення зв'язаних змінних за допомогою гільбертова \mathcal{E} -символа, дослідження арифметики за допомогою зв'язаних з \mathcal{E} -символом методів теорії доведень, використання \mathcal{E} -символа у вивченні логічного формалізму, метод арифметизації метаматематики в застосуванні до обчислення предикатів, причини, що викликають необхідність розширення методичних рамок теорії доведень тощо. Книга [2] – це суттєво перероблений варіант книги Г. Є. Шилова. У главі 2 [2] викладено теорію визначників, лінійні простори, системи лінійних рівнянь, лінійні функції векторного аргументу, перетворення координат, канонічна форма матриці лінійного оператора, білінійні і квадратні форми, евклідові простори, комплексні простори зі скалярним добутком, квадратичні форми в евклідовому й унітарному просторах тощо. У [3] представлено приклади та задачі з систем алгебраїчних рівнянь, границі функцій, дослідження функцій методами диференціального числення і побудова їх графіків, методи інтегрування функцій, поняття базису простору, застосування типів добутку векторів, геометричні додатки означених інтегралів (обчислення площ, а також об'ємів), тощо.

Теорії руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному та повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля присвячені дослідження, проведені в роботах [4–6] з використанням сучасного математичного апарату результатів [6].

Конкурентоспроможне проектування технологічних процесів і конструювання машин на етапі розробки теоретичних передумов до оптимізації параметрів процесу моделювання технологічних процесів наповнення геометричних структур робочих органів бункерного типу сільськогосподарських машин матеріалами сферичної форми можливе за умови освоєння і володіння знаннями загальнотеоретичних дисциплін. Так у навчальному посібнику [7], «Вища математика в прикладах і задачах», авторами Дубчаком В. М., Пришляком В. М. та Новицькою Л. І. подано перелік типових практичних завдань, у кожному з яких пропонується 100 незалежних варіантів, з метою організації самостійних, розрахунково-графічних робіт [8].

У частині I “Основ інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість” [8], описано основні положення дисципліни «Механіка матеріалів і конструкцій»: наведена класифікація сил залежно від способу їх прикладання, розглянуто метод перерізів при визначенні внутрішніх силових факторів, розроблено реальну конструкцію та її розрахункову схему; наведено алгоритм побудови епюр внутрішніх силових факторів від простих елементів конструкцій – побудова епюр нормальних сил для прямолінійних стержнів, побудова епюр крутних моментів для прямолінійних брусів, побудова епюр поперечних сил і згинальних моментів для прямолінійних брусів, особливості деформацій згину, визначення напрямків і величин опорних реакцій балок, визначення внутрішніх силових факторів у поперечних перерізах балок, визначено диференціальні залежності між згинальним моментом та інтенсивністю рівномірно розподіленого навантаження в перерізах балок, наведено приклади побудови епюр згинальних моментів і поперечних сил при плоскому поперечному згині, основні закономірності



контролю правильності побудови епюр згинальних моментів і поперечних сил, також наведено алгоритм побудови епюр внутрішніх силових факторів для плоских і просторових рамних конструкцій тощо.

Авторами М.С. Кравченком, Ю.А. Злобіним, О.М. Царенком у підручнику «Землеробство» частково проаналізовано руйнівну дію крапель дощу на поверхневу структуру ґрунту й водні ерозійні процеси, що при цьому виникають [8]. Зазначено, що найбільший ризик втрати родючого ґрунту виникає тоді, коли дощові краплі падають на поверхню при незначному поверхневому потоці води, тому що при цьому розбивання структурованих ґрунтових грудочок відбувається найсильніше: структурований ґрунт переходить у безструктурований і ерозійні процеси зростають. Якщо товщина водного шару перевищує діаметр крапель, то сила дії дощу на грудочки значно зменшується.

Книга 2, частина III «Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість» частина III [9] – це суттєво доповнений матеріал до роботи [8]. В частині III [9] розглянуто статично невизначені системи при розтягу (стиску), при крученні, при згині (теорема Кастільяно, інтеграл Максвелло-Мора, спосіб Верещагіна), розрахунок тонкостінних осесиметричних посудин (рівняння Лапласа, теорема про проекцію на задану вісь сил тиску, універсальні формули для визначення осьового і колового напружень для осесиметричних посудин, тощо).

Окрім руху часток у повітряних середовищах, інколи деякі процеси руху тіл відбуваються в рідинних середовищах. Найпростіші моделі рідинних середовищ розглянуто (з використанням законів збереження маси, кількості руху, збереження енергії, моментів кількості руху) А.Г. Куценко, С.М. Бондар, В.М. Пришляком у монографії «Біомеханіка суцільних середовищ» [9]. Відомо, що в теоретичній механіці для механічної системи закон моментів кількості руху має наступний зміст: похідна по часу від повного моменту кількості руху деякої системи матеріальних точок дорівнює головному моменту зовнішніх сил. На цьому законі автори в роботі [9] окремо зупинились, проаналізували і дали певний розвиток. Також розкрито теоретичні особливості таких понять і середовищ, як ідеальна, в'язка (ньютонівська), нетеплопровідна, нестислива і стислива рідини.

У [10] представлено змінні Лагранжа і Ейлера, інтеграли Бернуллі і Лагранжа, теорія згину Кірхгова-Лява, застосування теорії Флюке до вивчення явища поширення хвиль вздовж шарнірно закріпленої балки, метод скінчених елементів у задачах стаціонарних коливань оболонок, тощо. При цьому обов'язково враховувались механіко-технологічні властивості головних об'єктів, з якими взаємодіють робочі органи машин: вода [10], мінеральні добрива в розчинах і сипучому стані, частки сільськогосподарських культур, зерно, коренебульбоплоди, тощо.

Питання оптимізації конструкцій технічних систем розглянуто авторами Ю.В. Човнюком, В.М. Пришляком, Л.С. Шимко, С.П. Приходьком в роботі [11]. Технології і машини з оптимальними параметрами найбільшою мірою відповідають вимогам точного землеробства.

Прикладні задачі механіки, котрі можливо застосувати під час проектування машин агропромислового виробництва, розглянуто А.Г. Куценко, М.М. Бондар, В.М. Пришляком, Л.С. Шимко в роботі [12]. Розв'язування прикладних задач є корисним як на етапі підготовки агроінженерних фахівців до професійної діяльності, так і в процесі проектування технічних засобів механізації.

Подальші загальнотеоретичні та методологічні підходи набули свого розвитку в роботах [13, 14].

Авторами Возняком О.М., Штуцем А.А., Замрієм М.А. розроблено контролер, призначений для лінійного переміщення рухомих органів виконавчих механізмів для вібраційних машин [14]. Авторами Цурканом О.В., Полеводою Ю.А., Присяжнюком Д.В. розроблено озонатор для сушіння зернової сировини, де сушильним агентом є суміш підігрітого повітря у поєднанні з озоном певної концентрації.

Авторами Булгаковим В.М., Кувачовим В.П., Солоною О.В., Борисом М.М. побудовано графіки нормованих кореляційних функцій вертикальних коливань мостового агрозасобу при його русі по слідах постійної технологічної колії.

3. Мета досліджень

Метою досліджень є оптимізація параметрів технологічних операцій і машин агропромислового виробництва для процесів руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному та повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля.

4. Результати досліджень

Маємо резервуар циліндричної форми з відповідними геометричними параметрами: R – радіус кола основи даної об'ємної фігури, H – її висота. Дана ємність наповнена деякою рідиною щільності ρ . Основною задачею даних досліджень будемо вважати порівняльні числові характеристики величин робіт по відкачуванню (підняттю на поверхню резервуара) об'єму даної рідини у двох випадках: у першому – якщо дана геометрична структура має горизонтальне розміщення своїх основ (рис. 1), у другому – коли такі основи циліндричної структури матимуть вертикальне положення (рис. 2).

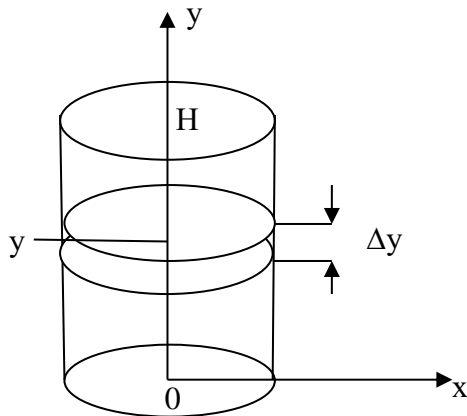


Рис. 1. Наповнена рідиною циліндрична ємність з горизонтально розташованими основами

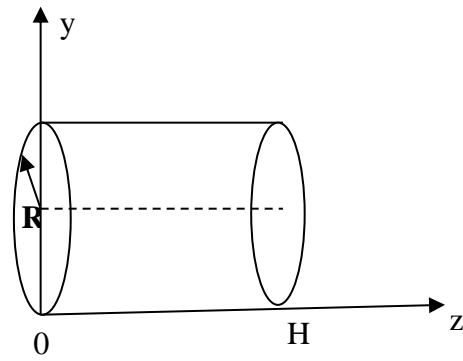


Рис. 2. Наповнена рідиною циліндрична ємність з вертикально розташованими основами

При встановленні величини такої роботи у кожному з приведених випадків маємо використати відомий фізичний закон [1-3], згідно якого у першому випадку (рис. 1) для підняття на поверхню такого резервуара елементарної маси рідини маси $\Delta m_1 \approx \pi \rho R^2 dy$, розташованої на довільно взятій висоті y , величина елементарної роботи ΔA_1 визначається наближено як добуток елементарної сили ваги $\Delta F \approx g \Delta m$ на відповідну висоту підйому, рівну $(H - y)$, при цьому $y \in [0; H]$, тобто

$$\Delta A_1 \approx \pi \rho g R^2 (H - y) \Delta y. \quad (1)$$

Як видно з останньої формули, величина елементарної роботи з підняття елементарно виділеного при довільно взятій ординаті y об'єму рідини на відповідну для підняття на поверхню резервуара висоту є величиною диференційованою (змінною) залежно від цієї самої ординати.

Якщо в даній рівності при умові, що Δy прямує до нуля, то і ΔA_1 теж прямуватиме до нуля, тож відповідні прирости аргументу та залежної від нього функції можемо замінити диференціалами цих нескінченно малих величин, при цьому наближений знак рівності може бути замінений на точний, тобто:

$$dA_1 = \pi \rho g R^2 (H - y) dy. \quad (2)$$

Оскільки $A_1 = \int_0^H dA_1(y)$, тоді, провівши інтегрування правої частини останньої рівності по змінній y в межах можливої зміни даного аргументу, замінюючи при цьому наближений знак рівності на точний, маємо остаточний результат шуканої роботи A_1 :

$$A_1 = \int_0^H \pi \rho g R^2 (H - y) dy = -\frac{1}{2} \pi \rho g R^2 d(H - y) = -\frac{1}{2} \pi \rho g R^2 (H - y)^2 \Big|_0^H = \frac{1}{2} \pi \rho g R^2 H^2. \quad (3)$$

Аналогічним чином встановимо величину роботи A_2 , необхідну для того, щоб підняти на поверхню резервуару весь об'єм рідини, коли основи такої циліндричної структури будуть розташовані вертикально (рис. 2). Рівняння дуги кола основи в обраній системі координат визначається як

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2, \text{ звідки } x = \pm \sqrt{R^2 - (y - R)^2}, y \in [0; 2R]. \quad (4)$$

На довільно взятій висоті y елементарна маса прошарку рідини при такому розташуванні заданої циліндричної структури визначатиметься наступним чином:

$\Delta m_2 \approx 2x \rho H \Delta y$, виходячи з відповідної формули встановлення об'єму елементарного паралелепіпеда висоти Δy . Тоді елементарна сила, необхідна для підняття на поверхню такої конструкції всіх часток рідини з вказаної висоти розташування таких часток y і врахуванням приведенного значення x , визначатиметься як:

$$\Delta F_2 \approx 2 \rho g H \sqrt{R^2 - (y - R)^2} \Delta y, y \in [0; 2R]. \quad (5)$$

Отже така елементарна сила рівна силі ваги виділеного на висоті y елементарного об'єму для даної рідини. Далі, враховуючи той факт, що частки цього елементарного об'єму рідини мають бути піднятими на висоту підйому $(2R - y)$, елемент роботи ΔA_2 визначатиметься як

$$\Delta A_2 \approx 2 \rho g H \sqrt{R^2 - (y - R)^2} (2R - y) \Delta y, y \in [0; 2R]. \quad (6)$$

Як і в першому випадку, замінюючи прирости функції та її аргументу на відповідні диференціали цих нескінченно малих величин, маємо певний вираз у вигляді визначеного інтегралу для підсумкового встановлення величини всієї сумарної роботи A_2 у наступному вигляді:



$$\begin{aligned}
A_2 &= \int_0^{2R} 2\rho g H (2R - y) \sqrt{R^2 - (y - R)^2} dy = \left(\begin{matrix} R - y = t \\ dy = -dt \\ t \in [-R; R] \end{matrix} \right) = \\
&= 2\rho g H \int_R^{-R} (R - t) \sqrt{R^2 - t^2} d(-t) = \\
&= 2\rho g H R \int_{-R}^R \sqrt{R^2 - t^2} dt - 2\rho g H \int_{-R}^R t \sqrt{R^2 - t^2} dt = 2\rho g H R \int_{-R}^R \sqrt{R^2 - t^2} dt = \\
&= 4\rho g H R \int_0^R \sqrt{R^2 - t^2} dt = 4\rho g H R \left. \frac{t\sqrt{R^2 - t^2}}{2} \right|_0^R + 4\rho g H R \left. \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{t}{R} \right|_0^R = \pi \rho g R^3 H. \quad (7)
\end{aligned}$$

(Тут маємо $\frac{t\sqrt{R^2 - t^2}}{2} \Big|_0^R = 0$, $\arcsin 1 = \frac{\pi}{2}$, також $\int_{-R}^R t \sqrt{R^2 - t^2} dt = 0$ як інтеграл від непарної під знаком інтегралу функції по симетричному відносно точки 0 проміжку інтегрування).

Таким чином, остаточно маємо:

$$A_1 = \frac{1}{2} \pi \rho g R^2 H^2, \quad (8)$$

$$A_2 = \pi \rho g R^3 H. \quad (9)$$

Виходячи з останніх отриманих результатів, можемо порівняти ці величини і взяти їх відповідне відношення:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{H}{2R}, \text{ або } A_1 = \frac{H}{2R} A_2. \quad (10)$$

Маємо наступні можливості:

$$\frac{H}{2R} > 1 \Leftrightarrow H > 2R \Leftrightarrow A_1 > A_2, \quad (11)$$

$$\frac{H}{2R} < 1 \Leftrightarrow H < 2R \Leftrightarrow A_1 < A_2, \quad (12)$$

$$\frac{H}{2R} = 1 \Leftrightarrow H = 2R \Leftrightarrow A_1 = A_2. \quad (13)$$

Таким чином, величини шуканих робіт в обох випадках будуть рівними тоді і тільки тоді, коли висота (твірна) H такої циліндричної структури співпадатиме з її діаметром $2R$, що є логічним підсумком таких досліджень.

Також можемо відмітити, що у випадку, коли положення циліндричної структури є таким, що її основа має горизонтальне розташування, величина відповідної роботи буде пропорційною одночасно квадрату радіуса і квадрату висоти такої структури (рис. 3), а якщо така ємність матиме горизонтальне розташування з вертикальними обома основами (рис. 4), то величина шуканої роботи вже буде пропорційною одночасно кубу радіуса кола основи та висоті (твірній) такої структури відповідної геометрії.

Розглянемо аналогічну задачу щодо підняття на поверхню деякої рідини з резервуару (ємності) іншої геометрії, а саме, конуса з радіусом кола основи R та висоти h (рис. 3). Рівняння такої геометричної поверхні буде наступним:

$$x^2 + y^2 = \frac{R^2}{h^2} z^2, z > 0, z = h. \quad (14)$$

На довільно обраній висоті z даної ємності квадрат радіуса r проміжного кола як $r^2 = \frac{R^2}{h^2} z^2$, тому визначення елементарної роботи щодо підняття на поверхню часток рідини, розташованих на висоті z на вертикальну відстань висоти підйому, рівну $(h - z)$, визначатиметься наступною умовою: $\Delta A_1 \approx \pi \rho g r^2 (h - z) \Delta z = \pi \rho g \frac{R^2}{h^2} z^2 (h - z) \Delta z$, отож значення всієї сумарної роботи матиме вигляд:

$$A_1 = \int_0^h \pi \rho g \frac{R^2}{h^2} z^2 (h - z) dz = \frac{1}{12} \pi \rho g R^2 h^2. \quad (15)$$

Якщо поверхню конуса розвернути в протилежну відносно осі Oz сторону таким чином, щоб його вершина була спрямованою догори (рис. 4), то рівняння такої конічної поверхні буде мати вигляд: $x^2 + y^2 = \frac{R^2}{h^2} (h^2 - z^2), z > 0, z = h$, тоді:

$$\Delta A_2 \approx \pi \rho g r^2 (h - z) \Delta z = \pi \rho g \frac{R^2}{h^2} (h^2 - z^2) (h - z) \Delta z, \quad (16)$$

тому вся сумарна робота A_2 визначатиметься таким чином як

$$A_2 = \int_0^h \pi \rho g \frac{R^2}{h^2} (h^2 - z^2) (h - z) dz = \frac{5}{12} \pi \rho g R^2 h^2. \quad (17)$$

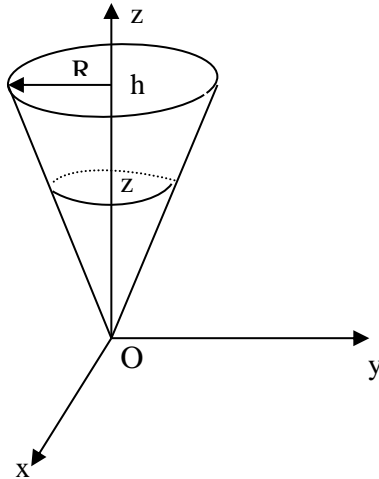


Рис. 3. Наповнена рідиною конічна ємність з нижнім розташуванням її вершини

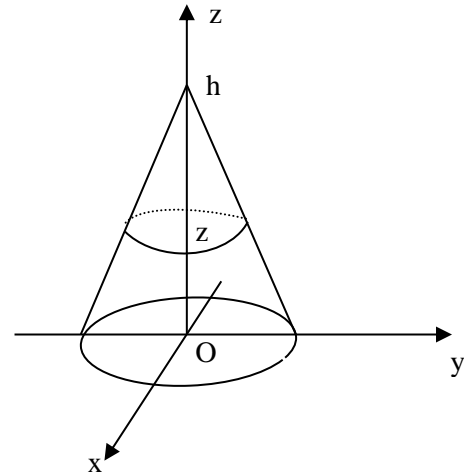


Рис. 4. Наповнена рідиною конічна ємність з верхнім розташуванням її вершини

Розглянемо коротко суть такої ж задачі у випадку ємності сферичної форми радіуса R (рис. 5). У такому випадку в обраній тривимірній системі координат рівняння приведеної сферичної поверхні матиме вигляд:

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2, z \in [0; 2R]. \quad (18)$$

На довільно взятій висоті z квадрат радіуса r відповідного кола визначатиметься у вигляді: $r^2 = R^2 - (R - z)^2 = 2Rz - R^2$, тому величина елементарної роботи підняття на поверхню часток рідини з довільно взятої висоти z матиме наступний вигляд:

$$\Delta A \approx \pi \rho g r^2 (2R - z) \Delta z = \pi \rho g (2Rz - R^2) (2R - z) \Delta z. \quad (19)$$

$$r^2 = R^2 - (R - z)^2 = 2Rz - R^2. \quad (20)$$

Остаточно для величини всієї шуканої роботи отримаємо наступний результат:

$$A = \int_0^{2R} \pi \rho g (2Rz - R^2) (2R - z) dz = \int_0^{2R} \pi \rho g (5R^2 z - 2R^3 - 2Rz^2) dz = \frac{2}{3} \pi \rho g R^4. \quad (21)$$

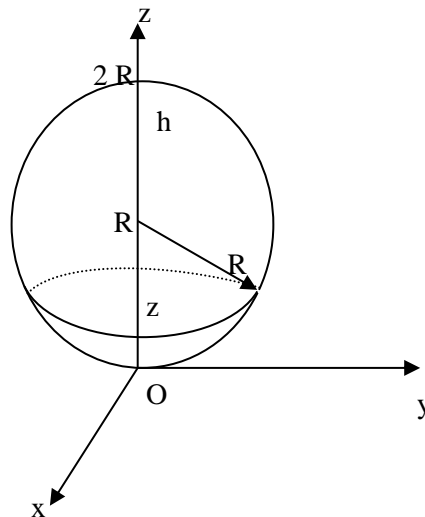


Рис. 5. Наповнена рідиною сферична ємність радіуса R в обраній системі координат

Вибір та обґрунтування гідравлічних і пневмогідравлічних пристроїв для внесення рідких мінеральних добрив. У машинах для внесення рідких мінеральних добрив транспортальною силою є сила ваги добрив або тиск, що створюється компресором чи гідронасосом. При гравітаційній системі подачі добрив (рис. 6,а) інтенсивність (швидкість) витікання добрив через дозувальний жиклер 5 визначається напором H , пропорційним різниці між рівнем вільної поверхні рідких добрив у цистерні 1 і рівнем вихідного отвору жиклера 5:

$$u = \mu (2gH)^{1/2}; \quad u = \mu (2gP/\gamma)^{1/2}, \quad (22)$$

де $\mu = 0,4 \dots 0,7$ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкості витікання рідини крізь отвір; H – напір, м; P – тиск на рівні вихідного отвору, Па; γ – питома вага рідини, Н/м³.

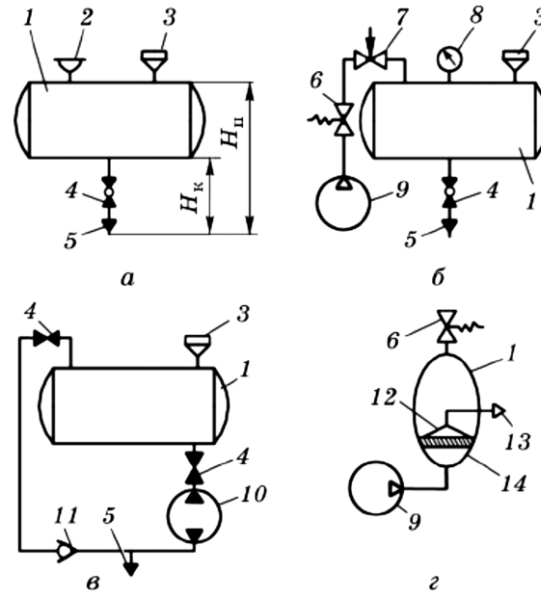


Рис. 6. Принципові схеми машин для внесення добрив:

а, б, в – рідких; г – пилоподібних; 1 – цистерна; 2 – сапун; 3 – заливна горло-вина; 4, 6, 11 – відповідно запірний, редукційний і перепускний клапани; 5 – жиклер; 7 – заслінка; 8 – манометр; 9 – компресор; 10 – насос; 12 – транспортувальний трубопровід; 13 – розпилювальний пристрій; 14 – аероднище.

Основний технологічний параметр транспортувального пристрою – секундна подача q , м³/с (кг/с), яка залежить від площі S вихідного отвору дозатора і швидкості u рідких добрив на виході [2, 4].

$$q = uS = \mu S (2gH)^{1/2}; q = \mu \gamma S (2gP)^{1/2}. \quad (23)$$

Задана система має істотний недолік – нерівномірність подачі протягом одного циклу в процесі спорожнення цистерни.

Згідно з попереднім виразом q пропорційна H , а оскільки H протягом циклу зменшується в 3...4 рази, то відповідно значення u , а разом з ним і q зменшуються вдвічі, що призводить до відповідної нерівномірності внесення добрив по ходу руху агрегату. Незважаючи на цей недолік, наведену схему завдяки своїй простоті застосовують у пристроях для внесення аміачної води на плугах, культиваторах та інших ґрунтообробних машинах.

Схема подачі рідких добрив за допомогою напору, що створюється компресором (рис. 6, б), істотно знижує зазначений недолік. Надлишковий тиск P_n , який створює компресор, значно перевищує тиск стовпа рідких добрив, що розміщується над вихідним отвором. Отже, загальний напір [2, 4].

$$P_{заг} = P/\gamma + H. \quad (24)$$

Для визначення швидкості струменя у різних перерізах трубопроводу застосовують рівняння нерозривності струменя [2, 4].

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 = u_i S_i = u_{вих} S_{вих} = const. \quad (25)$$

Із рівняння можна зробити висновок, що досить знати u у будь-якому перерізі потоку, наприклад на виході, щоб визначити швидкість протікання в іншому з відомою площею S . Для визначення місцевих втрат h_{em} вводять значення u у різних перерізах, виражені через $u_{вих}$. Завдяки редукційному клапану 6 тиск $P_n = const$, а оскільки $P_n / \gamma \gg H$, то загальний напір $H_{заг}$ у процесі спорожнення місткості змінюється значно менше, ніж при гравітаційній подачі. Зазвичай різниця між початковими і кінцевими значеннями H_n і H_k не перевищує 25 %. Для визначення швидкості $u_{вих}$ виходу рідких добрив використовують рівняння Бернуллі, яке для цього випадку має вигляд [2, 4].

$$H_{заг} = u_{вих}^2 / 2g + \Sigma h_{em}, \quad (26)$$

де Σh_{em} – сумарні втрати напору в місцевих опорах (у колінах, звуженнях, вентилях, тощо).

У загальному випадку

$$h_{em} = \xi [u^2 / 2g], \quad (27)$$

де ξ – коефіцієнт втрат; u – швидкість рідини в перерізі трубопроводу.

Наведену вище систему подачі добрив використовують у машинах для внесення рідких органічних добрив типу РЖТ.

У пневморозкидачі (рис. 6,г) пилоподібні добрива, завантажені в герметизовану місткість, насичуються повітрям, що надходить від компресора через аероднище (пилоподібні часточки добрив



не мають змоги випадати на поверхню ґрунту). Аерований пилоподібний матеріал під дією надлишкового тиску в цистерні надходить до транспортувального трубопроводу і через розпилювально-розсіювальний пристрій розподіляється по поверхні ґрунту.

Дальність польоту часточок добрив, робоча ширина захвату та продуктивність машини залежать від швидкості $u_{вих}$ руху матеріалу на виході із розпилювача, яку визначають за спрощеним виразом [2, 4].

$$u_{вих} = (B_p g / \sin 2\alpha_0)^{1/2}, \quad (28)$$

де α_0 – початковий кут нахилу струменя пилоподібних добрив до горизонту, град, при $\alpha_0 = 15 \dots 20^\circ$, $B_p = 15 \dots 20$ м.

У цей час секундна подача пневмотранспортувальних пилоподібних добрив становить

$$q = \rho S_{вих} u_{вих}, \quad (29)$$

де ρ – щільність аерованого матеріалу.

Рівномірність розподілу пилоподібних добрив по ходу руху машини забезпечується тоді, коли потрібна розрахункова швидкість суміші на виході із розсіювального пристрою є сталою – $u_{вих} = const$.

Для забезпечення цієї умови в цистерні підтримується надлишковий тиск, який можна визначити з рівняння Бернуллі [2, 4].

$$P_{над} = \gamma u_{вих}^2 / 2g + \Sigma \Delta P, \quad (30)$$

де $\Sigma \Delta P$ – сума втрат тиску в місцевих опорах.

У загальному випадку втрати тиску в місцевому опорі становить

$$\Delta P_i = \xi_i \gamma (u_i^2 / 2g). \quad (31)$$

Із рівняння суцільного потоку $u_i S_i = u_{вих} S_{вих}$ можемо встановити, що:

$$u_i = u_{вих} S_{вих} / S_i. \quad (32)$$

Отримаємо формулу для визначення втрат тиску в будь-якому місцевому опорі залежно від швидкості потоку на виході [2, 4].

$$\Delta P_i = \xi_i (S_{вих} / S_i)^2 (\gamma v_i^2 / 2g). \quad (33)$$

Дістанемо рівняння Бернуллі в більш розгорнутому вигляді [2, 3, 5].

$$P_{над} = \gamma u_{вих}^2 / 2g [1 + \Sigma \xi_i (S_{вих} / S_i)^2]. \quad (34)$$

Секундну подачу повітря на пневмотранспортування добрив можна визначити за формулою

$$q = V_{nut} q, \quad (35)$$

де V_{nut} – питомі витрати повітря (витрати на переміщення 1 кг матеріалу); q – секундна подача добрив.

Подача добрив розпилювальним пристроєм залежить від робочої ширини захвату машини і швидкості її руху по полю, а також від заданої норми внесення на одиницю площі:

$$q = B_p v_m Q_{зад}, \quad (36)$$

де B_p – робоча ширина захвату; v_m – швидкість машини; $Q_{зад}$ – задана норма внесення.

Як правило, робоча ширина захвату машини стала, швидкість руху машини можна змінювати, але незначно. Норма внесення визначається агровимогами і залежно від умов може змінюватися в широких межах, наприклад від 100 до 10 000 кг/га.

Подачу пилоподібних добрив крізь дозувальний вихідний отвір визначають за виразом [2, 3, 5].

$$q = \mu S_p (2gP / \gamma)^{1/2}. \quad (37)$$

Відповідність дози внесення добрив заданій нормі їх розподілу на одиницю площі досягають за умови:

$$\mu S_p (2gP / \gamma)^{1/2} = B_p v_m Q_{зад}. \quad (38)$$

Для виконання цієї умови потрібно, щоб подача добрив насосом перевищувала максимальні витрати, зумовлені величинами B_p , v_m і $Q_{зад}$. Отже, $q_n > q_{max}$. Відповідність дози внесення добрив заданій нормі досягають відкриванням перепускного клапана.

Потужність, яка потрібна для приведення насоса в дію,

$$N_n = P q_n / \eta, \quad (39)$$

де P – тиск, що створюється насосом; q_n – подача насоса; $\eta = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт корисної дії насоса.

5. Висновки

У результаті проведення наукових досліджень із залученням фундаментального математичного апарату розроблено теоретичні основи руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному та повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля, а також методику розрахунку дощувальної установки, що доцільно застосовувати у проектно-конструкторській практиці та агроінженерній підготовці майбутніх фахівців агропромислового виробництва.

Список використаних джерел

1. Вигодський М. Я. Довідник з елементарної математики. Київ. 2019. 512 с.



2. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. *Економічні науки*. Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. 2010. Випуск 5. Том 3. 199 с.
3. Овчинников П. Ф., Яремчук Ф. П., Михайленко В. М. Вища математика. Київ. Техніка. 2007. 600 с.
4. Пришляк В. М., Дубчак В. М. Теорія і практика руху сільськогосподарських матеріалів у рідинному та повітряному середовищах за умови дії гравітаційного поля. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2 (113). С. 121–133.
5. Дубчак В.М., Пришляк В.М. Моделювання технологічних процесів наповнення геометричних структур робочих органів бункерного типу сільськогосподарських машин матеріалами сферичної форми. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 4 (103). 2021. С. 77–89.
6. Liu Zhong. Hydropower generation unit and its selection. Training course on renewable energy for developing countries. *Changsha: Ministry of Commerce of the People's Republic of China*. 2011. P. 178–274.
7. Дубчак В. М., Пришляк В. М., Новицька Л. І. Вища математика в прикладах та задачах: навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2018. 254 с.
8. Кравченко М. С., Злобін Ю. А., Царенко О. М. Землеробство: підручник. Київ: «Либідь». 2002. 496 с.
9. Куценко А. Г., Бондар С. М., Пришляк В. М. Біомеханіка суцільних середовищ: монографія. Київ: НУБіП України. 2014. 512 с.
10. Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Бондар М. М., Пришляк В. М. Машини та обладнання в сільськогосподарській меліорації: підручник. Київ: «Хай-Тек Прес». 2011. 488 с.
11. Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Швайко В. М., Пришляк В. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч. I, II. Підручник. Київ: «Хай Тек-Прес». 2011. 616 с.
12. Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Швайко В. М., Пришляк В. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч. III. Підручник. Київ: «Хай Тек-Прес». 2013. 528 с.
13. Човнюк Ю. В., Пришляк В. М., Шимко Л. С., Приходько С. П. Оптимізація конструкцій технічних систем: навчальний посібник. Ніжин: Вид. «Аспект Поліграф». 2006. 464 с.
14. Куценко А. Г., Бондар М. М., Пришляк В. М., Шимко Л. С. Прикладна механіка в прикладах та задачах: підручник. Ніжин: Вид. «Аспект Поліграф». 2015. 804 с.

References

- [1] Vygodsky, M.Ya. (2019). *Dovidnyk z elementarnoyi matematyky. [Handbook of elementary mathematics]*. Kyiv. [In Ukrainian].
- [2] Zbirnyk naukovykh prats Vinnitskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. (2010). *Seriya «Ekonomiczni nauky»*. Redkolehiya: Kaletnik H.M. (holovnyy redactor) ta inshi [Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series «Economic Sciences». Editorial Board: Kaletnik GM (editor in chief) and others]. Vinnytsia, 5(3), 199 p. [In Ukrainian].
- [3] Ovchinnikov, P.F., Yaremchuk, F.P., Mikhaileenko, V.M. (2007). *Vyshcha matematyka. [Higher mathematics]*. Kyiv: Machinery. [In Ukrainian].
- [4] Pryshlyak, V.M., Dubchak, V.M. (2021). *Teoriya i praktika rukhu silskohospodarskykh materialiv u ridynnomu ta povitryanomu seredovyshchakh za umovy diyi. [Theory and practice of movement of agricultural materials in liquid and air environments under the action of gravitational field]*. *Engineering, energy, transport AIC*, 2(113), 121–133. [In Ukrainian].
- [5] Dubchak, V.M., Prishlyak, V.M. (2021). *Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv napovnennya heometrychnykh struktur robochykh orhaniv bunkernoho typu. [Modeling of technological processes of filling of geometrical structures of working bodies of bunker type of agricultural machines with spherical materials]*. *Vibration in engineering and technology*, 4(103), 77–89. [In Ukrainian].
- [6] Liu, Zhong (2011). Hydropower generation unit and its selection. Training course on renewable energy for developing countries. *Changsha: Ministry of Commerce of the People's Republic of China*. 178–274. [in English].
- [7] Dubchak, V.M., Pryshlyak, V.M., Novitskaya, L.I. (2018). *Vyshcha matematyka v prykladakh ta zadachakh [Higher Mathematics in Examples and Tasks]*. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian].
- [8] Kravchenko, M.S., Zlobin, Yu.A., Tsarenko, O.M. (2002). *Zemlerobstvo [Agriculture]*. Kyiv: Lybid. [in Ukrainian].
- [9] Kutsenko, A.G., Bondar, M.M., Pryshliak, V.M. (2014). *Biomekhanika sutsil'nykh seredovyshch: monohrafiya. [Biomechanics of continuous media]*. Nizhin: Aspect Polygraph Publishing House LLC. [in Ukrainian].
- [10] Kaletnik, G.M., Chausov, M.G., Bondar, M.M., Pryshliak, V.M. and others. (2011). *Mashyny ta obladnannya v sil'skohospodars'kii melioratsiyi [Machines and equipment in agricultural land reclamation]*. Kuiv: High-tech Press. [in Ukrainian].
- [11] Kaletnik, G.M., Chausov, M.G., Pryshlyak, V.M. (2011). *Fundamentals of engineering methods of calculations for strength and rigidity. Part I, II. Textbook*. Kuiv: Khay Tek-Pres. [in Ukrainian].



- [12] Kaletnik, G.M., Chausov, M.G., Pryshlyak, V.M. and others. (2013). *Fundamentals of engineering methods of calculations for strength and rigidity*. Part III. Textbook. Kuiv: Khay Tek-Pres. [in Ukrainian].
- [13] Chovnyk, Yu.V., Pryshliak, V.M., Shymko, L.S., Prykhodko, S.P. (2006). *Optymizatsiya konstruktivnykh system* [Optimization of designs of technical systems]. Nizhin: Aspect Polygraph Publishing House LLC. [in Ukrainian].
- [14] Kutsenko, A.M., Bondar, M.M., Pryshliak, V.M., Shymko L.S. (2015). *Prykladna mekhanika v prykladakh ta zadachakh* [Applied mechanics in examples and problems]. Nizhyn: LLC Publishing House «Aspect Polygraph». [in Ukrainian].

CALCULATION OF WORK IN ONE APPLIED TECHNICAL TASK WITH DIFFERENT GEOMETRY OF LOCATION AND COMPARISON OF RESULTS

The article considers algorithms for constructing equivalent models of filling tanks with agricultural fluids, such as fuels and lubricants, pesticides, organic fertilizers and other bulk solids, which can be equated, the dynamics of movement (resistance, work, power) to the movement of liquid.

Growing requirements in the competitive market cause constant improvement and justification of optimal parameters and forms of tanks for transportation of materials that ensure the production operation of complex technical systems.

The article presents a variety of possible technical solutions for tanks (tanks) for storage and transportation of liquid materials on the field surface with different variable steepness.

Theoretical bases of practical direction of movement of agricultural materials in air and liquid environments for conditions of action of a gravitational field are developed. The technical features of the working bodies and the system for the introduction of liquid materials as needed (changes in soil hardness, slope steepness, speed of the unit) are analyzed.

Innovative development of competitive agro-industrial technologies and agricultural machinery is possible only with the involvement of a powerful physical and mathematical apparatus, which is also problematic due to lack of fundamental theoretical knowledge of designers, designers and students of agro-engineering assistance.

As a result of research using the fundamental analytical and mathematical apparatus, algorithmic models have been developed that describe the movement of liquid (mineral fertilizers) for their movement.

Such processes and phenomena occur during the production operation of agricultural machinery with tanks for moving liquid materials (fertilizers), etc.

The application of the algorithm of mathematical analysis and calculation of technological processes and technical systems provides the necessary conditions for efficient supply of liquid materials, fertilizers, which is important in precision farming systems.

Similar, proposed innovative methods of theoretical and synthesis of processes, phenomena, the nature of agro-industrial production, can be effective in preparing for the educational process of agricultural engineers for project professional activities.

Key words: theory, practice, reservoir, numerical characteristics, work calculation, fluid movement, agricultural materials.

F. 39. Fig. 6. Ref. 14.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Дубчак Віктор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Пирогова, 111/21, м. Вінниця, Україна, 21037, e-mail: viktor_dubchak@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3641>).

Пришляк Віктор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: viktor.prishlyak@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3675-3381>).

Viktor Dubchak – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies of Vinnitsa National Agrarian University (Pirogov St., 111/21, Vinnitsa, Ukraine, 21037, e-mail: viktor_dubchak@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3641>).

Viktor Prishlyak – Ph.D., Associate Professor of the Department of Agroengineering and technical service of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: viktor.prishlyak@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3675-3381>).