



УДК 631.3:531.5

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-13

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ У РІДИННОМУ
ТА ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩАХ ЗА УМОВИ ДІЇ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ**

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

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

Існуючі технології й сучасні технічні засоби не завжди забезпечують необхідну якість виконання технологічних процесів вирощування сільськогосподарських культур. Зростаючі вимоги у конкурентному ринковому середовищі обумовлюють необхідність постійного вдосконалення існуючих і створення нових високопродуктивних машин та машинних агрегатів для забезпечення якісного виконання технологічних процесів у системах точного землеробства.

У статті викладено удосконалені теоретичні засади практичного прикладного спрямування руху сільськогосподарських матеріалів у повітряному та рідинних середовищах за умови дії гравітаційного поля.

В результаті проведення досліджень з використанням фундаментального аналітико-математичного апарату розроблено алгоритмічну модель, що описує рух насіння чи мінеральних добрив на шляху переміщення від висівних апаратів до борозенок, які утворюються в ґрунті після проходження сошників сівалок; рух зерна, котре переміщується зверху вниз у системах очистки зернозбиральних комбайнів або під час вивантажування з бункера та ін. Такі процеси і явища відбуваються під час виробничого функціонування сівалок і саджалок, машин для післязбирального обробітку зерна, збирання коренебульбоплодів, фруктів, ягід і т. п.

Особлива увага приділена падінню крапель дощу чи крапель, які створені системами зрошення. Проаналізовано вплив ударної дії крапель на поверхню поля, що забезпечує розробку практичних рекомендацій із запобігання ерозійних процесів ґрунтів, що особливо актуально на полях із складним рельєфом місцевості. Розглянуто деякі технічні системи створення «штучного дощу», обґрунтовано їх технологічні схеми та оптимізовано конструктивні і технологічні параметри.

Застосування алгоритму математичного аналізу та розрахунку технологічних процесів і технічних систем забезпечує створення необхідних умов для проростання насіння, росту і розвитку сільськогосподарських культур як на рівнинних полях так і на схилі землях. Крім того, запропоновані інноваційні методи теоретичного аналізу та розрахунку процесів і явищ, характерних для агропромислового виробництва, можуть ефективно і якісно застосовуватись у навчальному процесі під час підготовки агроінженерів до проектної професійної діяльності.

Ключові слова: теорія, практика, рух сільськогосподарських матеріалів, рідинне та повітряне середовище, гравітаційне поле.

Ф. 35. Табл. 1. Рис. 6. Літ. 9.

1. Постановка проблеми

Вченими агропромислової галузі та інноваційно-налаштованими ініціативними сільгосптоваровиробниками за останні роки досліджено і науково обґрунтовано низку нових технологічних процесів і технічних засобів систем точного та інтенсивного землеробства. Кожна технологія направлена на отримання максимального прибутку від агропромислового виробництва за рахунок зниження собівартості виробленої продукції та підвищення її якості, збільшення урожайності, збереження родючості ґрунтів. До основних факторів, які визначають урожайність сільськогосподарських культур, якість отриманої продукції, конкурентоспроможність виробництва, відносяться технологічні операції зі зрошення полів, сівки чи садіння, внесення добрив, хімічного захисту рослин, збирання та переробки зернових культур, коренебульбоплодів, фруктів, ягід та ін. Виконання більшості операцій забезпечено сучасними технічними засобами механізації, котрі



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

Під час виконання технологічних процесів переміщення матеріалів за умови дії гравітаційного поля слід враховувати, що сила удару часточок в момент падіння часто призводить до негативних наслідків. Так, наприклад, падаючі краплі в результаті удару розбивають грудочки і переводять ґрунт в стан, котрий легко піддається ерозійним процесам; падіння бульб, коренеплодів, плодів, ягід призводить до їх травмування і подальшого псування, зниження товарної цінності і т. п.

Безсумнівно, що інноваційний розвиток конкурентоспроможних агропромислових технологій і сільськогосподарської техніки можливий тільки з залученням потужного фізико-математичного апарату, що інколи є проблемним через нестачу фундаментальних теоретичних знань у проектувальників і конструкторів агроінженерного спрямування.

Іноді неефективне використання машинних систем зрошення з подачею води методом дощування призводить до втрати ґрунтом структурності, після поливу і подальшого інтенсивного висихання зовнішнього шару утворення твердої поверхневої кірки, погіршення водно-повітряного режиму, розпилення ґрунту, зниження його родючості. Важливою, не вирішеною проблемою сівби та садіння сільськогосподарських культур є точність і рівномірність розподілу насіння, котра залежить від багатьох факторів, у тому числі і від висоти падіння. Це обумовлює підвищені вимоги до конструкцій сівалок, саджалок, машин для внесення добрив та іншої сільськогосподарської техніки для забезпечення виконання агротехнічних вимог технологій точного землеробства задля підвищення екологічності та якості вирощеної продукції.

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

2. Аналіз останніх досліджень та 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.

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, 4]. 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 [3] – це суттєво перероблений варіант книги Г. Є. Шилова «Введение в теорию линейных пространств». У главі 2 [3] 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 [4] 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.

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).



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 [5]. Вченими [5] 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.

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» [6]. 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 [6] окремо зупинились, проаналізували і дали певний розвиток. Також тут [6] розкрито теоретичні особливості таких понять і середовищ, як ідеальна, в'язка (ньютонівська), нетеплопровідна, нестислива і стислива рідини.

При цьому обов'язково враховувались механіко-технологічні властивості головних об'єктів, з якими взаємодіють робочі органи машин: вода [7], 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 [8]. Технології і машини з оптимальними параметрами найбільшою мірою відповідають вимогам точного землеробства.

Прикладні задачі механіки, котрі можна застосувати під час проектування машин агропромислового виробництва, розглянуто А.Г. Куценко, М.М. Бондар, В.М. Пришляком, Л.С. Шимко в [9]. Розв'язування прикладних задач є корисним як на етапі підготовки агроінженерних фахівців до професійної діяльності, так і в процесі проектування технічних засобів механізації.

3. Мета дослідження

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. Виклад основного матеріалу

У реальному агропромисловому виробництві відбуваються процеси і явища руху різноманітних часток у повітряному чи рідинному середовищах за умови дії гравітаційного поля. Наприклад: у рідкому стані вода в вигляді крапель падає на ґрунт під час атмосферних опадів або зрошення [5]; насіння чи мінеральні добрива переміщуються від висівних апаратів до борозенок, які утворюються в ґрунті після проходу сошників сівалок; зерно переміщується зверху вниз у системах очистки зернозбиральних комбайнів або під час вивантажування з бункера та ін. Такі ж явища відбуваються у машинах для післязбиральної обробки зерна, збирання коренебульбоплодів, фруктів і т. п.

Падіння часток має як позитивний, так і негативний результат. Дослідженнями встановлено, що під час дощу швидкість падіння крапель досягає близько 10 м/с [5], що призводить до відокремлення часточок ґрунту та сприяє розвитку водної ерозії. Експериментально відокремлення часточок ґрунту під дією дощових крапель досліджується за допомогою спеціальних білих дощечок з нанесеними на них поділками у сантиметрах. Встановлення цих дощечок на чисто обробленому полі дає змогу вимірювати висоту і кількість часточок ґрунту, відокремлених краплями під час дощу різної інтенсивності [5]. За рахунок розмивання та проштовхування дрібних ґрунтових часток у пори поверхні поля, краплі дощу, що падають з великою кінетичною енергією, призводять до ущільнення ґрунту. Ущільнена поверхня поля понижує поглинання дощової води ґрунтом, що сприяє зростанню водної ерозії, особливо на схилі землях значної крутизни.

Розглянемо деякі прикладні задачі, що теоретично описують процеси і явища реального агропромислового виробництва.

Нехай тіло маси m падає вертикально вниз під дією сили своєї ваги. Одночасно на дане тіло діє сила опору середовища (повітря), у якому дане тіло рухається. При цьому дана сила опору пропорційна швидкості тіла в даний момент часу з коефіцієнтом пропорційності k . Встановимо залежність



пройденого тілом шляху під час його вертикального польоту, якщо відомо в початковий момент часу при $t=0$ його координати S , його місцезнаходження та початкова швидкість, яка дорівнювала 0 , тобто $S(0)=0, V(0)=0$.

На основі 2-го закону Ньютона, що описує рух тіла, маємо $-ma = \sum_i F_i$, де $a=a(t)$ – функція прискорення тіла в момент часу t , тут в правій частині рівності записано алгебраїчну суму всіх активних сил, які діють на дане тіло. Оскільки $a = V'$, де $V=V(t)$ – функція швидкості тіла, котра змінюється з бігом часу t . Тоді, використовуючи умову задачі, маємо:

$$mV' = mg - kV, \quad (1)$$

де g – стала прискорення вільного падіння.

Використавши прості алгебраїчні перетворення, напишемо останню рівність (1) у вигляді:

$$V' + \frac{k}{m}V = g, \quad V(0)=0. \quad (2)$$

Дане диференціальне рівняння 1-го порядку підлягає аналітичному вирішенню:

$$\begin{aligned} V(t) &= \alpha(t)\beta(t), \\ V' &= \alpha'\beta + \beta'\alpha, \\ \alpha'\beta + \frac{k}{m}\alpha\beta + \beta'\alpha &= g, \\ \beta(\alpha' + \frac{k}{m}\alpha) + \beta'\alpha &= g. \end{aligned}$$

Стосовно першої невідомої функції $\alpha(t)$ маємо наступну умову:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{k}{m}\alpha \quad \text{або} \quad \frac{d\alpha}{\alpha} = -\frac{k}{m}dt.$$

Інтегруючи останню рівність, отримуємо: $\ln|\alpha| = -\frac{k}{m}t$. Звідси

$$\alpha(t) = e^{-\frac{k}{m}t}. \quad (3)$$

Знайшовши $\alpha(t)$, отримаємо наступне диференціальне рівняння стосовно невідомої функції $\beta = \beta(t)$:

$$e^{-\frac{k}{m}t} \frac{d\beta}{dt} = g, \quad \text{або} \quad d\beta = g e^{\frac{k}{m}t} dt.$$

Проінтегруємо останню рівність і рівність:

$$\beta(t) = \frac{mg}{k} e^{\frac{k}{m}t} + C_1. \quad (4)$$

Стосовно функції $V(t)$ маємо наступне значення:

$$V(t) = e^{-\frac{k}{m}t} \left(\frac{mg}{k} e^{\frac{k}{m}t} + C_1 \right) = \frac{mg}{k} + C_1 e^{-\frac{k}{m}t}.$$

Оскільки $V(0)=0$ – в силу однієї з початкових умов. Тоді:

$$V(0) = 0 = \frac{mg}{k} + C_1 e^0.$$

Отож

$$C_1 = -\frac{mg}{k}.$$

Таким чином:

$$V(t) = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}t}). \quad (5)$$

Відомо, що координати $S=S(t)$, які встановлюють положення тіла при його вертикальному падінні, визначається як $S'(t) = V(t)$, тому

$$\frac{ds}{dt} = \frac{mg}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t} \right),$$

або

$$ds = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}t}) dt. \quad (6)$$

Проінтегруємо праву та ліву частини останньої рівності і отримаємо:

$$S(t) = \frac{mg}{k} \left(t + \frac{m}{k} e^{-\frac{k}{m}t} \right) + C_2, \quad S(0)=0.$$

Тому, стосовно констант C_2 маємо рівність: $0 = \frac{m^2 g}{k^2} e^0 + C_2$.

Звідси $C_2 = -\frac{m^2 g}{k^2}$.

Таким чином координата S змінюється вздовж вертикальної осі за наступним законом:

$$S(t) = \frac{mg}{k} \left(t + \frac{m}{k} (e^{-\frac{k}{m}t} - 1) \right). \quad (7)$$



Асимптотично на нескінченності дана функція збігається до лінійної залежності пропорційної величині

$$\frac{mg}{k} \left(t - \frac{m}{k} \right).$$

У якості проміжного висновку можемо зауважити, що дана математична модель має місце при відносно невеликих величинах швидкостей. Наприклад, вертикальне занурення тіла (пірнальника, гідробатискафа, підводного човна, тощо) добре узгоджується з отриманим результатом (7) приведених вище досліджень математичної моделі.

Проведена вище математична модель певною мірою стане складнішою, коли досліджуватиметься вертикальне падіння того ж тіла з відносно великою швидкістю, наприклад, падіння тіла з великої висоти в атмосфері. Тоді приймається, що сила опору середовища є пропорційною квадрату або навіть кубу швидкості тіла у даний момент часу.

Розглянемо по суті ту ж саму задачу та її вирішення у випадку, коли сила опору середовища при падінні тіла пропорційна квадрату швидкості даного тіла. Тому маємо рівняння вигляду:

$$mV' = mg - kV^2. \quad (8)$$

За початкової умови $S(0)=0$, $V(0)=0$.

Перепишемо рівняння у вигляді:

$$\frac{m}{k} \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{k} - V^2, \quad \text{або} \quad \frac{dV}{\frac{mg}{k} - V^2} = \frac{k}{m} dt.$$

Інтегруючи останню рівність, маємо:

$$\frac{1}{2\sqrt{\frac{mg}{k}}} \ln \left(\left| \frac{\sqrt{\frac{mg}{k}} + V}{\sqrt{\frac{mg}{k}} - V} \right| \right) = \frac{k}{m} t + C_1. \quad (9)$$

В силу умови $V(0)=0$, маємо значення константи $C_1=0$, тоді

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{mg}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{mg}{k}} + V}{\sqrt{\frac{mg}{k}} - V} \right| = \frac{k}{m} t, \quad (9^*)$$

або

$$\ln \left| \frac{\sqrt{\frac{mg}{k}} + V}{\sqrt{\frac{mg}{k}} - V} \right| = 2\sqrt{\frac{kg}{m}} t, \quad \text{або} \quad \frac{\sqrt{\frac{mg}{k}} + V}{\sqrt{\frac{mg}{k}} - V} = e^{2\sqrt{\frac{kg}{m}} t}.$$

Знайдемо $V=V(t)$ з останньої рівності:

$$V(t) = \sqrt{\frac{mg}{k}} \frac{e^{2\sqrt{\frac{kg}{m}} t} - 1}{e^{2\sqrt{\frac{kg}{m}} t} + 1} = \sqrt{\frac{mg}{k}} \frac{e^{\sqrt{\frac{kg}{m}} t} - e^{-\sqrt{\frac{kg}{m}} t}}{e^{\sqrt{\frac{kg}{m}} t} + e^{-\sqrt{\frac{kg}{m}} t}} = \sqrt{\frac{mg}{k}} \frac{\text{Sh}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t)}{\text{Ch}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t)} = \sqrt{\frac{mg}{k}} \text{th}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t). \quad (10)$$

Так само як і в попередній моделі $\frac{dS}{dt} = V(t)$, тому

$$dS = \sqrt{\frac{mg}{k}} \text{th}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t) dt. \quad (11)$$

Інтегруємо останню рівність, звідси маємо:

$$S(t) = \sqrt{\frac{mg}{k}} \int \text{th}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t) dt = \sqrt{\frac{mg}{k}} \cdot \sqrt{\frac{m}{kg}} \int \frac{d\text{ch}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t)}{\text{ch}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t)} = \frac{m}{k} \ln \text{ch}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t) + C_2. \quad (12)$$

Враховуючи умову $S(0)=0$, $\text{ch}0=1$, отримаємо: $S(0)=0=\frac{m}{k} \ln 1 + C_2$. Звідки $C_2=0$.

Таким чином остаточне значення шуканої функції $S(t)$ набуде вигляду:

$$S(t) = \frac{m}{k} \ln \text{ch}(\sqrt{\frac{kg}{m}} t). \quad (13)$$

Отриманий вираз (13) є функцією, яка визначає закон падіння тіла (сільськогосподарського матеріалу) з оптимально обґрунтованої висоти.

Нехай тепер швидкість руху тіла пропорційна кубу швидкості руху даного тіла, тобто рівняння руху такого тіла буде наступним:

$$mV' = mg - kV^3. \quad (14)$$

Аналітично дане рівняння вдається вирішити наполовину, проінтегрувавши перший раз і встановивши значення функції швидкості, яка задовольнить умову (14), маємо

$$\frac{m}{k} \frac{dV}{dt} = \frac{mg}{k} - V^3, \quad \text{звідки}$$



$$\frac{dV}{h^3 - V^3} = \frac{m}{k} dt, \text{ тут } h = \sqrt[3]{\frac{mg}{k}} \text{ та } \frac{k}{m} = \frac{g}{h^3}.$$

При інтегруванні лівої частини отриманого диференціального рівняння в диференціалах скористаємось наступними перетвореннями:

$$\frac{1}{h^3 - V^3} = \frac{A}{h - V} + \frac{BV + C}{h^2 - hV + V^2}. \quad (15)$$

Пропускаючи пошук неозначених коефіцієнтів, приводимо їх знайдені величини:

$$A = B = \frac{1}{h^2}, C = 0.$$

$$\int \frac{dV}{h^3 - V^3} = -\frac{1}{h^2} \ln|h - V| + \frac{1}{h^2} \ln|V^2 - hV + h^2| + \frac{1}{\sqrt{3}h^2} \operatorname{arctg}\left(\frac{h-2V}{\sqrt{3}h}\right). \quad (16)$$

Тому остаточно відносно функції $V=V(t)$ маємо наступний складний вираз:

$$\frac{1}{h^2} \left(\ln \left| \frac{\sqrt{V^2 - hV + h^2}}{h - V} \right| + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \left(\frac{h - 2V}{\sqrt{3}h} \right) \right) = \frac{g}{h^3} t + C_1. \quad (17)$$

Оскільки збережено першу початкову умову, за якої $V(0)=0$, це дає змогу встановити значення константи інтегрування C_1 :

$$\frac{1}{h^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{3}} = C_1. \quad (18)$$

Таким чином

$$\ln \left| \frac{\sqrt{V^2 - hV + h^2}}{h - V} \right| + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \left(\frac{h - 2V}{\sqrt{3}h} \right) - \frac{gt}{h} = \frac{\pi}{6\sqrt{3}}, \quad (19)$$

де $h = \sqrt[3]{\frac{mg}{k}}$.

Отримана стосовно $V(t)$ умова є неявною достатньо складною математичною функцією, з якої аналітично саму функцію V встановити неможливо, а тому і знайти іншу функцію $S(t)$, таку, що $S'(t) = V(t)$.

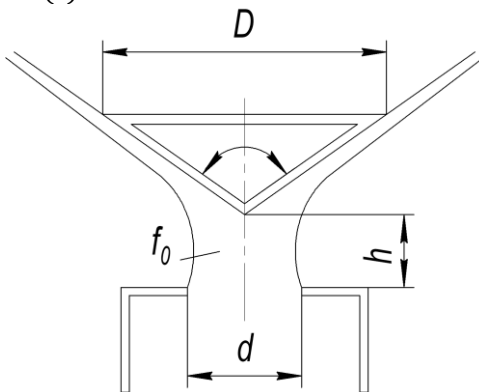


Рис. 1. Схема рефлекторної насадки

Розроблення теоретичних передумов до деяких технологічних процесів агропромислового виробництва і функціонування технічних систем сприяло оптимізації параметрів спеціальних сільськогосподарських машин. Крім того, результати проведених наукових досліджень показали, що висока якість навчального процесу досягається коли майбутні агроінженери проводять поглиблені теоретичні розрахунки машин, приймають участь у експериментальних лабораторно-польових дослідженнях розробок.

Наведемо приклад використання у науково-технічній діяльності та технологіях підготовки агроінженерів до інноваційної проектної діяльності елементів алгоритму теорії та розрахунку насадок і апаратів дощувальних машин та установок.

На рис. 1 представлено схему рефлекторної насадки, котра використовується в дощувальних машинах і установках.

Зазвичай приймають такі співвідношення $h = d$; $D = 2d$; $2\theta = 120^\circ$ (рис. 1).

Радіус зрошування R може бути визначений за такою формулою:

$$R = \frac{H}{0,43 + 0,0014 \frac{H}{d}}, \quad (20)$$

де H – напір перед отвором насадки.

Однією з важливих переваг щілинних насадок (рис. 2) є їх простота.

Таку насадку можна отримати пропилюванням на будь-якій трубі. Кут факела розбризкування φ_p визначається з такого співвідношення: $\varphi_p = (0,7 \div 0,9)\varphi$.

Менші значення цифрового коефіцієнта відповідають меншим значенням кута φ . Радіус зрошувального сектора визначають за формулою:

$$R = \frac{H}{1,15 + 0,0003 \frac{H}{h}} \quad (21)$$

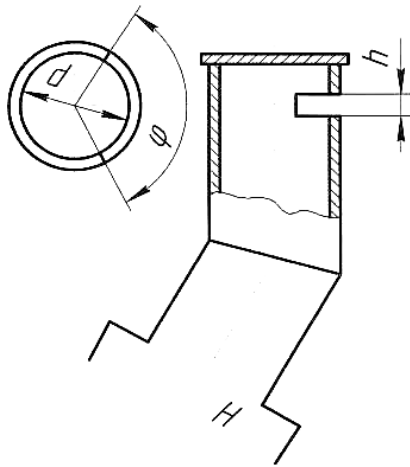


Рис. 2. Схема щілинної насадки

Рекомендоване співвідношення довжини щілини до її ширини 1:5, 1:10. Зрошувана площа має форму сектора з кутом φ_p . Приблизно на відстані $1/5R$ від насадки зрошування не відбувається.

Середньострумінні дощувальні апарати застосовують на більшості сучасних дощувальних машин і установок. Їх конструкції здебільшого однотипні, хоча і мають деякі суттєві розбіжності

Принцип роботи приблизно такий. Струмінь, який витікає зі ствола, зустрічає на шляху поворотний дефлектор і відбивну лопатку. При цьому передній кінець коромисла виштовхується убік, а саме коромисло повертається. При виході зі струменя дефлектор

повертається щодо коромисла. Коромисло, закручуючи пружину, повертається на кут близько 90° , потім під дією пружини повертається в попереднє положення.

Після досягнення початкового положення коромисло завдає приливом, що є на ньому, удару по приливу стовбура і повертає його на кут $2-5^\circ$ по ходу руху. Струмінь у цей момент потрапляє на задню частину дефлектора і повертає його в початкове положення. Потім передній кінець коромисла знову виштовхується із струменя і процес повторюється.

Ствол здійснює перервне обертання. Струмінь зрошує кругову площу. Конструкція може працювати без відбивної лопатки. У цьому випадку потрібне точніше регулювання положення дефлектора щодо струменя.

За умовної заміни дії струменя на кривий поворотний дефлектор і лопатку дією тільки на одну лопатку, розташовану на середньому радіусі, відповідно до рис. 3, a і b величина кутової швидкості коромисла після виходу дефлектора із струменя буде

$$\omega = 2 \sqrt{\frac{pfr\varphi \sin \alpha}{J_k}} \quad (22)$$

де J_k – момент інерції коромисла; φ – кут повороту коромисла, при якому струмінь впливає на дефлектор, $\varphi = (2 \div 3)\varphi_1$; p – тиск перед соплом.

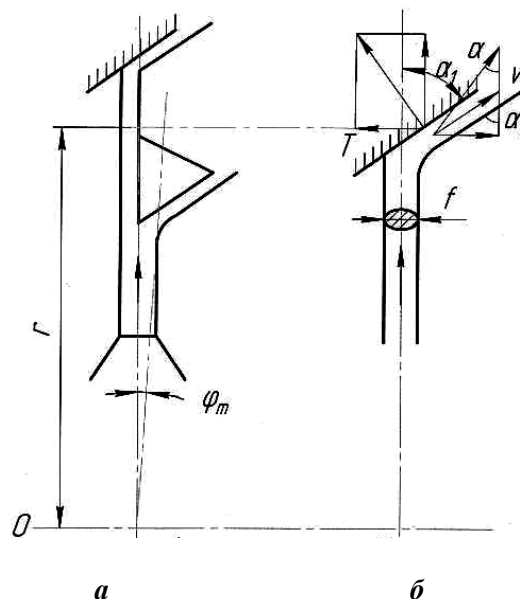


Рис. 3. Схема дефлектора середньострумінного дощувального апарата



Унаслідок того, що потік не повністю відхиляється дефлектором

$$\alpha = (0,7 \div 0,8)\alpha_1 \quad (23)$$

Максимальний кут повороту коромисла

$$\varphi_{\max} = \frac{2pfr \sin \alpha}{M_n} \quad (24)$$

де M_n – середнє значення моменту, що створюється пружиною під час повороту коромисла.

Кут повороту апарата за один хід коромисла

$$\psi_a = \frac{8pfr\varphi \sin \alpha}{M_T} \left[\frac{me^2}{J_k} + \cos^2 \theta \right] \cos^2 \theta \quad (25)$$

де M_T – момент тертя, який гальмує обертання апарата і рівний сумі моментів тертя в підшипнику і гумовій манжеті.

Повний час ходу коромисла в обох напрямках

$$t = 4 \frac{\sqrt{J_k pfr\varphi \sin \alpha}}{M_n} \quad (26)$$

Далекоструминні дощувальні апарати застосовуються в тих випадках, коли можливо і доцільно створювати в трубах напір 4...6 ат.

Поширені апарати з черв'ячними або зубчатыми механізмами обертання, які приводяться в дію від невеликої турбіни, що обертається під дією енергії основного струменя, який утворюється апаратом з турбінним приводом.

У конструкцію часто вводять механізми для надання апарату зворотньо-обертального руху усередині сектора кола для поливу по сектору в заданому напрямі. Кут сектора зазвичай регулюється.

Струмнь води, що витікає із сопла, приводить в обертання турбіну. На осі турбіни знаходиться черв'як, який обертає черв'ячну шестерню. Шестерня через вал передає обертання черв'якові, сполученому з черв'ячною шестернею. На осі шестерні є ексцентричний палець, який примушує гойдатися рамку. На рамці встановлено храповий механізм, що складається з двох шарнірно сполучених стержнів, пружини і собачки. Під дією стислої пружини собачка однією стороною відштовхується від нерухомої шестерні, завдяки чому здійснюється повільне перервне обертання дощувального апарата навколо вертикальної осі. На нерухомій шестерні є ряд пальців, що висуваються. При упорі хвостовика собачки в один з них положення її міняється, починає працювати інша її сторона і змінюється напрям обертання апарата. Таким чином можна здійснювати полив по сектору. Число обертів турбіни за хвилину визначається за формулою:

$$n_T = \frac{60u}{\pi D} \quad (27)$$

де u – колова швидкість кінців лопатей в м/с; D – діаметр турбіни по кінцях малих лопатей, м. Колову швидкість кінців лопатей можна визначити за формулою

$$u = k_0 v \quad (28)$$

де k_0 – коефіцієнт колової швидкості, $k_0 = 0,7 \dots 0,8$; v – швидкість рідини в струмені, м/с.

Швидкість рідини в струмені визначається за формулою

$$v = \varphi \sqrt{2gH} \quad (29)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, $\varphi = 0,97$; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; H – напір перед соплом, м вод. ст.

Число обертів далекоструминного дощувального апарата дорівнює:

$$n_a = \frac{n_T}{i} \quad (30)$$

де i – загальне передатне число редуктора між турбіною і корпусом апарата.

Дальність польоту струменя для середньо- і далекоструминних насадок може бути визначена за однією з таких емпіричних формул:

$$R = 0,42H + 1000d \quad (31)$$

або



$$R = \frac{H}{0,5 + 0,25 \frac{H}{d}} \quad (32)$$

Формули справедливі для кута нахилу струменя до горизонту 30°, тобто для кута, що відповідає найбільшій дальності, і відношенню

$$\frac{H}{d} \geq 800, \quad (33)$$

де H – напір перед соплом, м вод. ст.; d – діаметр струменя, м.

Дальність струменя можна визначати також, скориставшись експериментальним графіком, наведеним на рис. 4. Для різних діаметрів струменів побудовано серію кривих, що визначають зв'язок між H та R . Розпад струменя на краплі визначається відношенням H/d (табл. 1).

Таблиця 1

Розпад струменя на краплі [8]

H/d	Характеристика струменя
до 900	Суцільна, яка не розпадається на краплі
900–1500	Слабкий розпад на краплі, не придатні для зрошування
1500–1600	Розпад на краплі середньої величини, які придатні для зрошування трав на лугах і пасовищах
1700–1800	Розпад на краплі середньої дрібності, придатні для зрошування зімкнутих с.-г. культур
2000–2200	Розпад на дрібні краплі, придатні для зрошування всіх культур
2500–2600	Розпад на дуже дрібні краплі, придатні для зрошування розсади найніжніших рослин і квітів

Дальність струменя, визначена на графіку (рис. 4), може бути отримана тільки при правильно сконструйованому стволі і необертальному дощувальному апараті.

Дальність польоту струменя під час обертання апарата навколо вертикальної осі з числом оборотів 0,3...1 в хвилину зменшується на 10...15% порівняно з дальністю польоту струменя без обертання апарата. Рациональну форму ствола зображено на рис. 5. Більший кут нахилу до горизонту вибирається при напорі 1,5...3 ат, менший – при напорі більше 6...8 ат. Істотне значення для формування початкової ділянки струменя має заспокоювач 1, який складається з ряду перегородок, паралельних осі стовбура, що розділяють його живий перетин на ряд вузьких каналів.

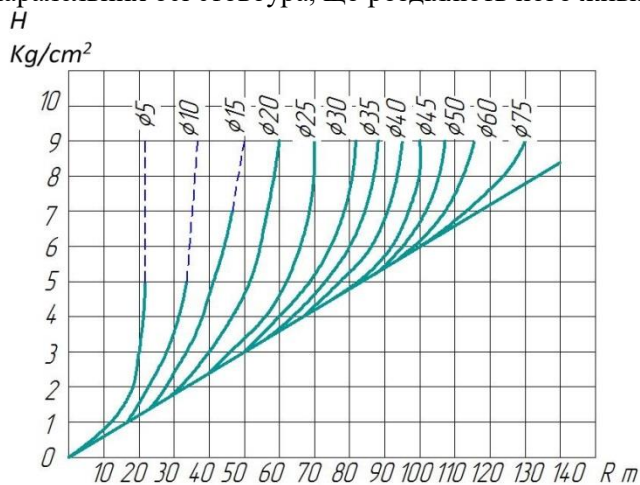


Рис. 4. Графік для визначення дальності польоту струменя

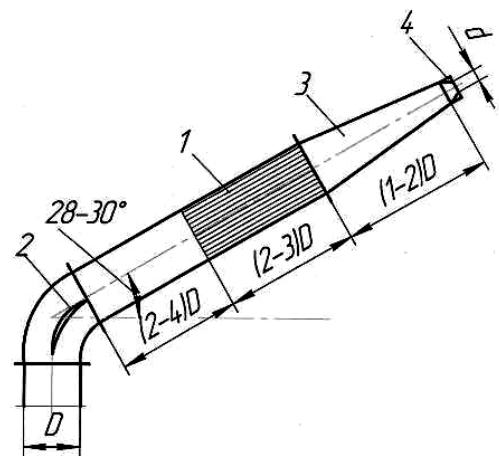


Рис. 5. Схема далекоструминного ствола:
1 – заспокоювач; 2 – ребро; 3 – конус;
4 – сопло.



Довжина осередків заспокоювача повинна бути в 12...15 разів більшою їх ширини. Діаметри ствола і заспокоювача повинні бути в 3...4 рази більше діаметра насадки. У коліні необхідно встановлювати ребра 2, які перешкоджають виникненню поперечної циркуляції швидкості в потоці. У середньострумнинних і деяких далекострумнинних стволах конус 3 не ставиться, а сопло 4 розташовується безпосередньо за вихідним кінцем заспокоювача. Раціональну форму сопла зображено на рис. 6, а.

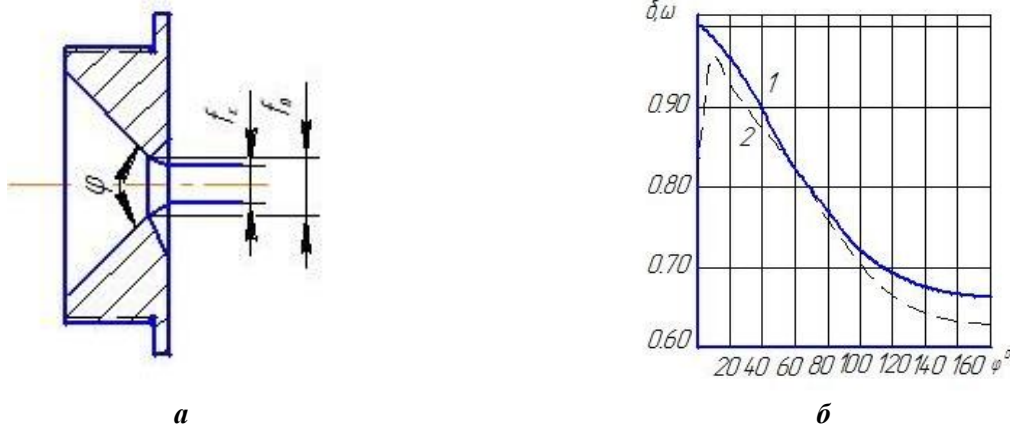


Рис. 6. Раціональна форма сопла

Витрату води через таку насадку визначають за формулою:

$$Q = \delta f_0 \sqrt{2gH} \quad (34)$$

де δ – коефіцієнт витрати, який визначається залежно від кута конусності насадки ϕ по кривій 2 (рис. 6, б).

Крива 1 дає значення коефіцієнта стиснення ϵ струменя:

$$\omega = \frac{f_c}{f_0} \quad (35)$$

Цим коефіцієнтом визначається діаметр сопла, необхідний для створення потрібного струменя.

Після вивчення механіко-технологічних властивостей ґрунту та інших сільськогосподарських матеріалів рекомендується проводити інженерні, технологічні та енергетичні розрахунки машин та обладнання сільськогосподарської меліорації. Як приклад, частково розглянемо лабораторно-практичну роботу «Складання укомплектованого й не укомплектованого графіків подачі води на сівозміну», котру виконують студенти спеціальності 208 «Агроінженерія», під час вивчення машин та обладнання в сільськогосподарській меліорації з метою вивчення особливостей та оволодіння методикою розрахунку внутрішньогосподарської мережі та методикою складання не укомплектованого графіку подачі води у технологічних процесах зрошування.

Спочатку рекомендується проаналізувати основні теоретичні положення, а також загальні відомості щодо систем зрошування.

Відомо, що експлуатація зрошувальних систем – сукупність організаційних і технічних заходів, які необхідні для підтримання всіх споруд системи в робочому стані, забезпечення ефективнішого використання зрошувальної води.

На магістральних розподільних каналах, аж до водовідлілів на землі господарств експлуатація здійснюється управлінням зрошувальної системи експлуатаційними ділянками. Розподіл води на землях господарств між окремими поливними ділянками, а також полив посівів сільськогосподарських культур здійснюються через внутрішньогосподарську зрошувальну мережу.

Експлуатація внутрішньогосподарської зрошувальної мережі, здійснювана господарством, полягає в наступних технологічних процесах: виконання поливів сільськогосподарських культур відповідно до плану водокористування, в належні агротехнічні строки за необхідними нормами, що забезпечують вирощування високих і сталих врожаїв; підтримання внутрішньогосподарських зрошувальних і дренажних каналів і споруд на них у робочому стані; відведення надлишкових вод у дренажну мережу, щоб запобігти заболочуванню та засоленню земель; обсаження каналів деревними фруктовими насадженнями та організація догляду за насадженнями.



У зазначених роботах, пов'язаних із експлуатацією внутрішньогосподарської зрошувальної мережі, працівники господарства – поливальники, повинні брати активну участь. Вони повинні не тільки проводити поливи сільськогосподарських культур, а й ремонтувати та підготовлювати зрошувальну мережу і споруди до поливів, скошувати й обприскувати укоси каналів гербіцидами; стежити, щоб канали й споруди були справними; брати участь у складанні внутрішньогосподарських планів водокористування. Поливи в господарствах слід проводити на основі складеного плану водокористування. Внутрішньогосподарський план водокористування господарства складають одночасно з виробничим планом.

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 й агроінженерній підготовці майбутніх фахівців агропромислового виробництва.

Список використаних джерел

1. 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. С. 178–274. [in English]
2. Гильберт Д., Бернайс П. Основания математики. Теория доказательств. Математическая логика и основания математики. Перевод с немецкого Н. М. Нагорного; под ред. С. И. Адяна. Москва : Наука, 1982. 654 с.
3. Шилов Г. Е. Математический анализ. Конечномерные линейные пространства. Москва : Наука, 1969. 432 с.
4. Дубчак В. М., Пришляк В. М., Новицька Л. І. Вища математика в прикладах та задачах : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2018. 254 с.
5. Кравченко М. С., Злобін Ю. А., Царенко О. М. Землеробство: підручник. Київ : Либідь, 2002. 496 с.
6. Куценко А. Г., Бондар С. М., Пришляк В. М. Біомеханіка суцільних середовищ : монографія. Київ : НУБіП України, 2014. 512 с.
7. Машины та обладнання в сільськогосподарській меліорації : підручник / Калетник Г. М., Чаусов М. Г., Бондар М. М., Пришляк В. М. та ін.; за ред. Г. М. Калетника та М. Г. Чаусова. Київ : Хай-Тек Прес, 2011. 488 с.
8. Оптимізація конструкцій технічних систем : навч. посіб. / Човнюк Ю. В., Пришляк В. М., Шимко Л. С., Приходько С. П. Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект Поліграф», 2006. 464 с.
9. Прикладна механіка в прикладах та задачах : підручник / Куценко А. Г., Бондар М. М., Пришляк В. М., Шимко Л. С. Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект Поліграф», 2015. 804 с.

References

- [1] 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]
- [2] Hilbert, D., Bernays, P. (1982). Osnovaniya matematiki. Teoriya dokazatel'stv / Matematicheskaya logika i osnovaniya matematiki // [Foundations of mathematics. Proof theory / Mathematical logic and foundations of mathematics]. Translated from German by N. M. Nagorny; ed. S. I. Adyan. Moscow: Nauka. [in Russian]
- [3] Shilov, G. Ye. (1969). *Matematicheskiy analiz. Konechnomernyye lineynyye prostranstva* [Mathematical analysis. Finite-dimensional linear spaces]. Moscow: Nauka. [in Russian]
- [4] 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]
- [5] Kravchenko, M.S., Zlobin, Yu.A., Tsarenko, O.M. (2002). *Zemlerobstvo* [Agriculture]. Kyiv: Lybid. [in Ukrainian]



- [6] 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]
- [7] Kaletnik, G.M., Chausov, M.G., Bondar, M.M., Pryshliak, V.M. and others. (2011). *Mashyny ta obladnannya v sil's'kohospodars'kiy melioratsiyi [Machines and equipment in agricultural land reclamation]*. K.: High-tech Press. [in Ukrainian]
- [8] Chovnyk, Yu.V., Pryshliak, V.M., Shymko, L.S., Prykhodko, S.P. (2016). *Optymizatsiya konstruksiyi tekhnichnykh system [Optimization of designs of technical systems]*. Nizhin: Aspect Polygraph Publishing House LLC. [in Ukrainian]
- [9] 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]

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ДВИЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЖИДКОСТНОЙ И ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Существующие технологии и современные технические средства не всегда обеспечивают необходимое качество выполнения технологических процессов выращивания сельскохозяйственных культур. Растущие требования конкурентной рыночной среды обуславливают необходимость постоянного совершенствования существующих и создания новых высокопроизводительных машин и машинных агрегатов для обеспечения качественного выполнения технологических процессов в системах точного земледелия.

В статье изложены усовершенствованные теоретические основы практического прикладного направления движения сельскохозяйственных материалов в воздушном и жидкостных средах в условиях действия гравитационного поля.

В результате проведения исследований с использованием фундаментального аналитико-математического аппарата разработана алгоритмическая модель, описывающая движение семян или минеральных удобрений на пути перемещения от высевальных аппаратов в бороздки, которые образуются в почве после прохода сошников сеялок; движение зерна, которое перемещается сверху вниз в системах очистки зерноуборочных комбайнов или во время выгрузки из бункера и др. Такие процессы и явления происходят во время производственного функционирования сеялок и сажалок, машин для послуборочной обработки зерна, сбор корнеклубнеплодов, фруктов, ягод и т. п.

Особое внимание уделено падению капель дождя или капель, которые созданы системами орошения. Проанализировано влияние ударного действия капель на поверхность поля, что обеспечивает разработку практических рекомендаций по предотвращению эрозионных процессов почв, а это особенно актуально на полях со сложным рельефом местности. Рассмотрены некоторые технические системы создания «искусственного дождя», обосновано их технологические схемы и оптимизированы конструктивные и технологические параметры.

Применение алгоритма математического анализа и расчета технологических процессов и технических систем обеспечивает создание необходимых условий для прорастания семян, роста и развития сельскохозяйственных культур как на равнинных полях так и на склоновых землях. Кроме того, предложенные инновационные методы теоретического анализа и расчета процессов и явлений, характерных для агропромышленного производства, могут эффективно и качественно применяться в учебном процессе при подготовке агроинженеров для проектной профессиональной деятельности.

Ключевые слова: теория, практика, движение сельскохозяйственных материалов, жидкостная и воздушная среда, гравитационное поле.

Ф. 35. Табл. 1. Рис. 6. Лит. 9.

THEORY AND PRACTICE OF AGRICULTURAL MATERIALS MOVEMENT IN LIQUID AND AIR ENVIRONMENTS UNDER CONDITIONS OF GRAVITATIONAL FIELD

Existing technologies and modern technical means do not always provide the required quality of technological processes of growing crops. The growing demands in a competitive market environment necessitate the constant improvement of existing and the creation of new high-performance machines and machine units to ensure the quality of technological processes in precision farming systems.



The article presents improved theoretical principles of practical applied direction of agricultural materials MOVEMENT in air and liquid environments under the action of gravitational field.

As a result of research using a fundamental analytical and mathematical apparatus, an algorithmic model has been developed that describes the movement of: seeds or mineral fertilizers on the way from seed drills to furrows, which are formed in the soil after the passage of seed drill openers; grain that moves from top to bottom in the cleaning systems of combine harvesters or during unloading from the hopper, etc. Such processes and phenomena occur during the production operation of seeders and planters, machines for post-harvest processing of grain, harvesting of roots, fruits, berries, etc.

Particular attention is paid to the fall of raindrops or drops created by irrigation systems. The influence of the impact of drops on the field surface is analyzed, which provides the development of practical recommendations for the prevention of soil erosion, which is especially relevant in fields with difficult terrain. Some technical systems of creating "artificial rain" are considered, their technological schemes are substantiated and constructive and technological parameters are optimized.

The application of the algorithm of mathematical analysis and calculation of technological processes and technical systems provides the necessary conditions for seed germination, growth and development of crops in both plain fields and on sloping lands. In addition, the proposed innovative methods of theoretical analysis and calculation of processes and phenomena characteristic of agro-industrial production can be effectively and used in the educational process during the preparation of agricultural engineers for project professional activities.

Key words: *theory, practice, movement of agricultural materials, liquid and air environment, gravitational field.*

F. 35. Table. 1. Fig. 6. Ref. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

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>).

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 Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии и технического сервиса Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: viktor.prishlyak@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3675-3381>).

Дубчак Виктор Николаевич: кандидат технических наук, доцент кафедры математики, физики и компьютерных технологий Винницкого национального аграрного университета (ул. Пирогова, 111/21, Винница, Украина, 21037, e-mail: viktor_dubchak@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1436-3641>).

Viktor Prishlyak – PhD, 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>).

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>).