



**Стаднік М.І.**  
д.т.н., професор

**Бабин І.А.**  
к.т.н., доцент

**Луц П.М.**  
к.т.н., ст. викладач

**Ріпа С.В.**  
аспірант

**Вінницький національний  
аграрний університет**

**Stadnik M.**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor

**Babyn I.**  
Ph.D., Associate Professor

**Luts P.**  
Ph.D., Senior Lecturer

**Ripa S.**  
postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian  
University**

**УДК 66.047.3**

**DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-11**

## **АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ ДОЗУВАННЯ ТА ЗМІШУВАННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ**

*У тепличному рослинництві важливу роль відіграють системи фертигації, які дозволяють поєднати процеси зрошення та внесення добрив, забезпечуючи оптимальне живлення рослин. Основним завданням таких систем є точне дозування та рівномірне змішування поживних розчинів, у тому числі різних видів добрив, з водою. Технологія фертигації дозволяє значно зменшити втрати води та добрив, а також підвищити ефективність їх використання на різних етапах росту рослин. Однак ефективність цих систем залежить від якості змішувально-дозувальних пристроїв, які повинні забезпечувати рівномірний розподіл поживних речовин у розчині.*

*На сьогоднішній день існують різні конструкції змішувачів для приготування поживних розчинів: механічні змішувачі з рухомими елементами та статичні змішувачі, які використовують для змішування гідравлічні потоки. Механічні змішувачі підходять для твердих і важкорозчинних добрив, але їх робота ускладнена наявністю рухомих частин. Статичні змішувачі прості у використанні та не мають рухомих частин, що робить їх ефективними та надійними для систем фертигації.*

*Проведено аналіз теоретичних досліджень пристроїв для дозування та змішування поживних розчинів, зокрема струминних змішувачів, що працюють за статичним принципом. Розглянуті пристрої для приготування рідких сумішей відносяться до ежекторного типу, на основі яких побудовано багато сучасних систем. Основну увагу приділено розрахункам оптимальних геометричних параметрів струминних дозаторів-змішувачів. Теоретичні дослідження більшості науковців зосереджені на визначенні коефіцієнта впорскування — як основного параметра, що визначає ефективність змішування та дозування. Теоретичні підходи також включають моделі турбулентного переносу частинок і напівемпіричні рівняння для оцінки якості змішування. Проте залишається недостатньо вивченим питання практичної оцінки якості багатокомпонентних змішувально-дозаторних сумішей.*

**Ключові слова:** фертигація, змішування, гідропоніка, дозатор, добрива, внесення добрив, поживний розчин, геометричні параметри, теплиця, землеробство.

**Вступ.** У тепличному рослинництві важливу роль відіграють системи фертигації, які дозволяють поєднати процеси зрошення та внесення добрив, забезпечуючи оптимальне живлення рослин. Основним завданням таких систем є точне дозування та рівномірне змішування живильних розчинів, що включає різні типи добрив, з водою. Технологія фертигації

дозволяє значно зменшити втрати води й добрив, а також підвищити ефективність їх використання на різних етапах росту рослин. Однак, ефективність цих систем залежить від якості роботи змішувальних і дозувальних пристроїв, які повинні забезпечувати рівномірний розподіл поживних речовин у розчині.

На сьогодні існують різні конструкції



змішувачів для приготування живильних розчинів: механічні змішувачі з рухомими елементами та статичні змішувачі, що використовують гідравлічні потоки для змішування. Механічні змішувачі підходять для твердих та важко розчинних добрив, але їхня експлуатація ускладнюється через наявність рухомих частин. Статичні змішувачі є простішими у використанні та не мають рухомих елементів, що робить їх ефективними та надійними для систем фертигації.

Проведений аналіз теоретичних досліджень пристроїв дозування та змішування живильних розчинів, зокрема струменевих змішувачів, які працюють за статичним принципом. Розглянуті пристрої для приготування рідких сумішей є ежекторного типу, на основі якого побудовано багато сучасних систем. Основна увага приділяється розрахункам оптимальних геометричних параметрів струменевих дозаторів-змішувачів. Теоретичні дослідження більшості вчених зосереджені на визначенні коефіцієнта інжекції — як ключового параметра, що визначає ефективність змішування та дозування. Теоретичні підходи також включають моделі турбулентного переміщення частинок та напівемпіричні рівняння для оцінки якості змішування. Однак, питання практичної оцінки якості багатокомпонентних сумішей змішувачів-

дозаторів залишається недостатньо вивченим.

**Мета досліджень.** Метою дослідження є аналіз та узагальнення теоретичних досліджень пристроїв для дозування і змішування живильних розчинів, що використовуються у системах фертигації. Завданням дослідження є вивчення конструкційних особливостей змішувачів та дозаторів, а також визначення їх оптимальних параметрів для підвищення ефективності процесу змішування, забезпечення рівномірного дозування та покращення якості живильних розчинів.

**Аналіз останніх публікацій.** У рослинництві під час одночасного внесення мінеральних добрив і зрошення використовуються поживні суміші води та добрив (рідкі добрива). Процес приготування рідких добрив включає кілька етапів: завантаження твердих добрив у ємність, додавання води для їх розчинення та використання мішалки для прискорення цього процесу і рівномірного змішування добрив із водою. Якщо розглядати технології приготування рідких добрив в умовах теплиць базуються на процесі перемішування, яке може відрізнитися за методами. На рисунку 1 представлена класифікація цих технологій, яка показує, що як циркуляційне, так і механічне змішування підходять для будь-яких речовин.

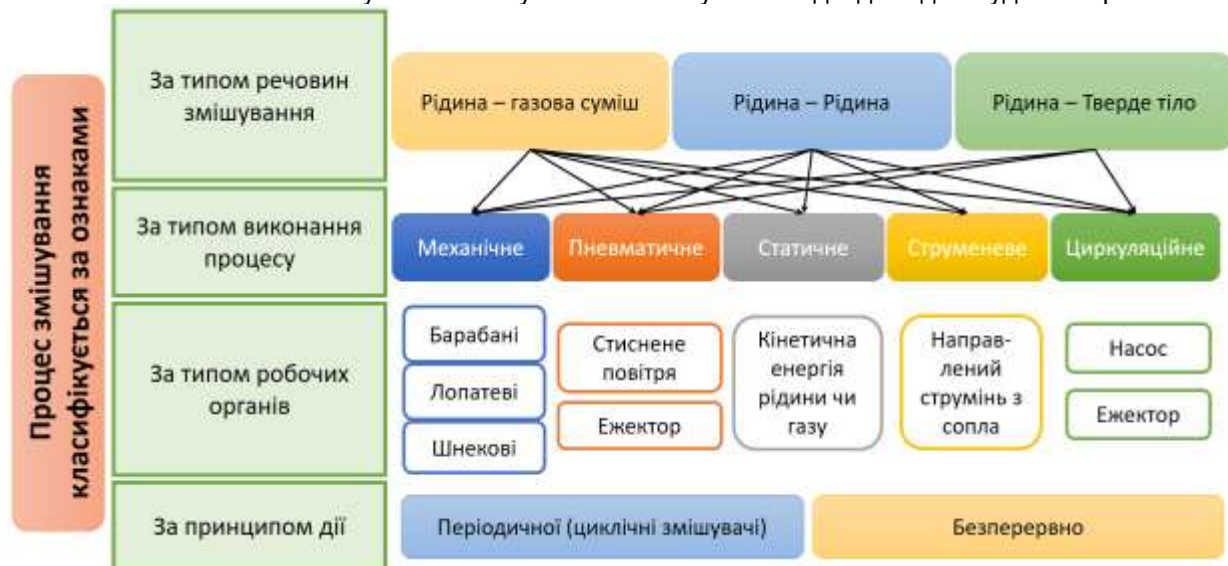
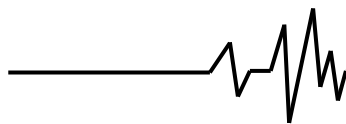


Рис. 1. Класифікація технологічного процесу змішування розчинів добрив

Однак циркуляційне перемішування особливо ефективно при використанні дрібнодисперсних і легко розчинних добрив. Механічне перемішування підходить для твердих добрив з різним гранулометричним складом, які важко розчиняються (наприклад, суперфосфат), і тому є найбільш поширеним методом [1]. На початку технологічного процесу приготування рідких добрив система являє

собойо взаємодію рідини з твердим тілом. Тверді добрива контактують з водою через потік рідини та піддаються механічній дії змішувачів.

Використання потокових технологій фертигації для тепличних господарств це поєднання зрошення та внесення добрив, що дозволяє оптимізувати живлення рослин та зменшити втрати води й добрив.



Процес фертигації включає декілька етапів (рисунок 2).

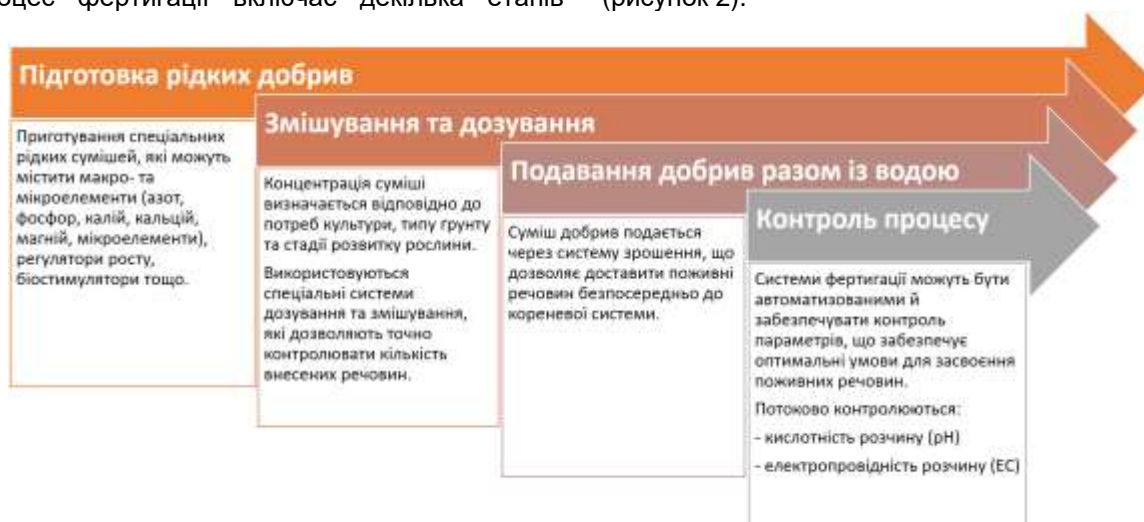


Рис. 2. Основні етапи процесу фертигації

Розглянувши основні переваги та принципи використання потокових технологій фертигації, можна виділити наступні етапи їх роботи: система подачі води забезпечує змішування води з добривами у спеціальних резервуарах або безпосередньо в лінії зрошення; вода з добривами рівномірно подається до рослин через капілярні або крапельні системи зрошення, що забезпечує ефективне живлення кожної рослини; дозатори фертигаційної системи регулюють концентрацію добрив у воді, що подається до рослин. Важливим етапом є контроль рівня pH та електропровідності (EC), який гарантує точне дозування поживних речовин для швидкого зростання та розвитку рослин.

Завдяки фертигації можна досягти

кращого управління водним балансом рослин, підвищити ефективність використання добрив та скоротити витрати на трудові ресурси. Потокові системи фертигації також дозволяють адаптувати режим живлення рослин в залежності від їх потреб на різних етапах росту. Таким чином, використання потокових технологій фертигації дозволяє тепличним господарствам ефективніше використовувати ресурси та підвищувати якість вирощуваних культур.

**Результати досліджень.** Виконуючі аналіз сучасних змішувачів рідких матеріалів з помірною в'язкістю та їхніх змішувальних елементів можливо скласти перелік для подальшого вивчення (рисунок 3):



Рис. 3. Класифікація змішувачів рідин, емульсій, розчинів та рідких сумішей

Одним із найбільш поширених та ефективних способів змішування рідких середовищ у сільськогосподарських системах фертигації є механічне змішування, що виконується рухомими мішалками [2]. Проте, наявність приводних рухомих елементів у таких

системах створює певні труднощі в експлуатації. Більш простим та надійним рішенням є статичні змішувачі проточного типу змішування рідин, які не мають рухомих частин і використовують гідравлічні принципи змішування.



Аналізуючи теоретичні дослідження статичних змішувачів можливо виділити один з відомих пристроїв для приготування рідких сумішей, що працюють за принципом статичних змішувачів - це ежектор. багато досліджень направлено на визначення оптимальних геометричних параметрів змішувачів струменевого типу. В напрямку розрахунків геометричних параметрів струменевих дозаторів-змішувачів аналітичним методом працювали такі вчені, як Зоремба В. А., Соколов М. В., Гуревич А. Л.. Вчені досліджували механізми, що впливають на ефективність цих пристроїв [3, 4]. Основна увага в більшості приділена обчисленню

коефіцієнта інжекції — ключового технологічного параметра такого типу насосів, що визначає ефективність процесу змішування та дозування (рисунок 4). Цей коефіцієнт відображає відношення кількості всмоктуваної рідини до кількості робочого середовища, що подається, і є важливим для оптимізації роботи змішувачів. Розроблені аналітичні методи дозволяють визначити оптимальні геометричні характеристики струменевих насосів, такі як діаметр сопла, конфігурація змішувальної камери, та інші параметри, що впливають на точність дозування і рівномірність змішування в системах для внесення рідких добрив.

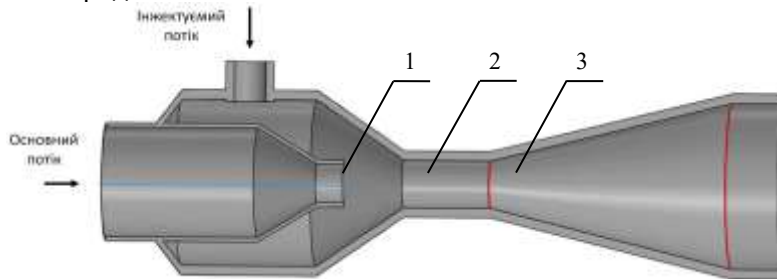


Рис. 4. Схема струменевого змішувача-дозатора: 1 - напірна частина; 2 - ділянка змішування; 3 - дифузور.

Концентрацію додаткового компонента та витрата дозатора-змішувача визначено через коефіцієнт інжекції.

$$G_i = U G_p \quad (1)$$

де  $G_i$  - витрати потоку рідини, що інжектуюється, кг/с;

$G_p$  - витрати рідини основного потоку, кг/с.

Аналітичні методи розрахунку конструктивних параметрів дозаторів-змішувачів не дозволяють оцінювати якість змішування рідких компонентів в змішувачах. Розчин запропонованих пристроїв вважається ідеально змішаним. Аналіз теоретичних досліджень струменевих насосів та ежекторів показав на недостатньо вивчене питання оцінки якості приготування рідких багатокомпонентних сумішей у струминних насосах та ежекторах, практичні дослідження в цьому напрямку значно випереджають теоретичні.

Визначення ефективності насадок-змішувачів на основі використання моделей, які працюють у граничному шарі та теорії турбулентного переміщення часток розглядав Герберт Шухардт. Він працював над проблемами ефективності змішування для промислових систем. У якості ключового оціночного параметра якості суміші наводиться вплив конструктивних параметрів на якість змішування [5]. Розраховано коефіцієнт перенесення імпульсу:

$$\mu = \frac{1,8 \left( \frac{P U_{сер} \gamma}{H \rho} \right)}{5,3 + 2,5 \ln (u d / 2 v)} \quad (2)$$

де  $P$  - зміна тиску, Па;

$U$  - щільність частки, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  - робочий діаметр, м;

$u$  - динамічна швидкість тертя, м/с;

$U_{сер}$  - середня швидкість середовища,

м/с;

$\mu$  - в'язкість рідини, Па/с.

Даний вираз відповідає характеру однофазних та гетерогенних середовищ, щільності яких близькі. За для обліку турбулентності визначається умова:

$$\omega_E \tau_f = \frac{\pi \rho_f d_f^2 f}{9 \mu} < 0,01 \quad (3)$$

де  $\omega_E$  - частота пульсацій кутова, с<sup>-1</sup>;

$\tau_f$  - час відновлення фракції, с;

$\rho_f$  - щільність фракції, кг/м<sup>3</sup>;

$d_f$  - розмір фракції, м;

$f$  - частота пульсацій, с<sup>-1</sup>.

Критерієм оцінки якості суміші є параметр  $\eta$

$$\eta = 1 - \exp(-N_0), \quad (4)$$

де  $N_0$  - кількість одиниць переносу.

Пропонована модель ґрунтується на напівемпіричних формулах і передбачає надання значень коефіцієнтів опору конструкції змішувачів, що оцінюються. Таким чином їх визначення експериментальне та вимагає додаткових витрат часу та ресурсів.

У своїй роботі Пітер Літвіненко описує дослідження закручення потоку рідини у





циліндричному змішувачі з встановленими ребрами [6]. Дослідження направлені на вивчення механізмів інжекції в струменевих змішувачах, розробляючи параметри для покращення роботи пристроїв у фертигаційних системах. (рисунк 5)

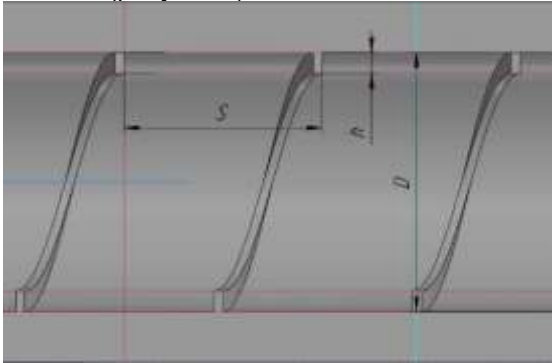


Рис. 5. Приклад схеми каналу з частковим закручуванням потоку

Геометричні параметри каналів з частковим встановленням ребер оцінюються інтенсивністю закручення потоку. Найбільшого поширення з цього напрямку отримали методи розрахунку та інженерні підходи для поточкових змішувачів з розглядом турбулентних і дифузійних процесів запропоновані Вурзель А. Ф. [7]. Досліджено методику інженерного розрахунку проточних змішувачів, за якістю виконання технологічного процесу. Оцінено інтенсивність змішування. Встановлено основні фактори, що впливають на інтенсивність змішування та розглянуто турбулентні процеси, що виникають у процесі роботи.

Дійсно турбулентність істотно впливає на процес змішування, але й збільшується витрата енергії, що необхідна для змішування. Проведений аналіз впливу турбулентності на якість приготування суміші показує, що якість суміші не повністю залежить від режиму роботи. Впливові значення мають конструкційні особливості конструкції змішувача. З метою вивчення змішувачів, та впливу конструктивних особливостей на розподіл додаткових компонентів суміші запропоновано рівняння визначення дифузії за рахунок турбулентних пульсацій:

$$\frac{\partial c(x, r)}{\partial \tau} = -\omega \frac{\partial c(x, r)}{\partial x} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c(x, r)}{\partial r} \right), \quad (5)$$

де  $D_r$  – турбулентна дифузія,  $m^2/s$ ;

$r$  – радіус краплі компоненту, що вноситься,  $m$ ;

$\omega$  – кутова швидкість краплі компоненту,  $рад/с$ .

Запропонована методика розрахунку поточкових змішувачів добрив пропонує проведення випробувань та отримання

артеріальних рівнянь з математичними моделями адаптованими тільки для умов змішування рідини з нафтою.

Експериментальні дослідження, що проводив А.А. Халатов висвітлюють геометричні параметри змішувачів із закручуванням потоку у циліндричних тангенційно-лопатевих та аксіально-тангенційних змішувачах [8].

$$n = 2R \frac{8 M_{cp}}{\pi K_{cp}}, \quad (6)$$

де  $M_{cp}$  – середній момент кількості руху потоку;

$K_{cp}$  – середня кількість переміщеного потоку,

У розглянутій роботі не піднімалися питання теоретичної оцінки якості отриманої суміші. Експериментальні дослідження геометричних параметрів змішувачів і закручування потоку в циліндричних змішувачах.

Проаналізовані теоретичні дослідження сучасних змішувачів рідин з помірною в'язкістю дозволяють виділити особливості різних типів змішувальних елементів, застосованих у фертигаційних та промислових системах. Оптимізація геометричних параметрів статичних змішувачів, особливо таких характеристик як діаметр сопла, конфігурація змішувальної камери та коефіцієнт інжекції, є ключовим аспектом для забезпечення точності дозування та рівномірного змішування. Важливим показником для оцінки ефективності є коефіцієнт інжекції, який дозволяє визначити співвідношення витрат рідин у змішувачах струменевого типу. Аналіз також вказує на важливість врахування турбулентності і конструктивних параметрів для забезпечення оптимальних характеристик змішування.

Експериментальні дослідження демонструють, що турбулентність значно впливає на інтенсивність змішування та енергетичні витрати процесу, проте якість суміші не завжди прямо залежить від режиму роботи. Значну роль відіграють конструкційні особливості, такі як закручування потоку та розміщення елементів для перемішування.

Таким чином, для покращення якості змішування у струменевих змішувачах перспективними є розробки моделей, що враховують турбулентні пульсації та дифузійні процеси, а також впровадження інноваційних геометричних рішень для підвищення ефективності процесу в умовах промислового застосування.

**Висновки.** У результаті проведеного аналізу теоретичних досліджень статичних змішувачів і струменевих дозаторів було визначено ключові параметри для



забезпечення рівномірного дозування та якості змішування рідких добрив. Оптимізація геометричних характеристик, таких як діаметр сопла, конфігурація змішувальної камери і коефіцієнт інжекції, забезпечує точність дозування та рівномірність змішування, що є критичним у фертигаційних системах. Застосування статичних змішувачів на основі гідравлічних принципів, зокрема, струменевих ежекторів, виявилось ефективним завдяки простоті конструкції та відсутності рухомих частин, що спрощує їх експлуатацію та знижує витрати на обслуговування.

Хоча експериментальні дослідження демонструють важливість конструктивних особливостей і вплив турбулентності на процес змішування, практичні дослідження все ж випереджають теоретичні розробки, особливо у питанні оцінки якості суміші. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення конструкцій змішувачів та адаптацію моделей до сучасних потреб сільського господарства для підвищення точності дозування та якості багатокомпонентних розчинів.

#### Список використаних джерел

1. Мазур В.А., Гулько І.В., Бабін І.А. Дослідження технологічного процесу внесення рідких добрив у ґрунт. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2 (101). С. 5-14.

2. Мікульонюк І.О. Інноваційні змішувачі хімічної технології. *Монографія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2022. 132 с.

3. Зоремба В. А., Юнкін П. А., Безменников Д. Н. Дослідження ефективності технологічних процесів внесення рідких добрив. *Журнал агротехнологій*. 2020. № 11. С. 42-53.

4. Соколов М. В., Гуревич А. Л. Дослідження роботи імпульсних систем автоматизації в агротехніці. *Технології аграрного виробництва*. 2019. № 42. С. 131-142.

5. Shuchart H. *Industrial Mixing: Theory and Practice*. Wiley-VCH Verlag, 2004.

6. Літвіненко П. Інжекційне змішування у фертигаційних системах: порівняльне дослідження ежекторів та статичних змішувачів. *Журнал досліджень у галузі аграрного машинобудування*. 2012. Т. 17. № 4. С. 315-329.

7. Wurzel A.F., *Engineering Calculations for Flow Mixers: Process Performance and Efficiency*. CRC Press, 2011.

8. Халатов А.А. Дослідження закручування потоку у циліндричних змішувачах. *Журнал досліджень у галузі промислової та інженерної хімії*. 2015. Т. 54. № 6. С. 702-718.

#### References

1. Mazur V.A., Hunko I.V., Babyn I.A. (2018). Doslidzhennia tekhnolohichnoho protsesu vnesennia ridkykh dobryv u grunt. [Research on the technological process of applying liquid fertilizers to the soil]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, № 2 (101), 5–14. [in Ukrainian].

2. Mikulionok I.O. (2022). Innovatsiini zmishuvachi khimichnoi tekhnolohii. Monograph [Innovative Mixers in Chemical Technology]. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 132. Kyiv [in Ukrainian].

3. Zoremba V.A., Yunkin P.A., Bezmennikov D.N. (2020). Doslidzhennia efektyvnosti tekhnolohichnykh protsesiv vnesennia ridkykh dobryv. [Research on the effectiveness of technological processes in liquid fertilizer application]. *Journal of Agrotechnology*, № 11, 42–53. [in Ukrainian].

4. Sokolov M.V., Gurevich A.L. (2019). Doslidzhennia roboty impulsnykh system avtomatyzatsii v ahrotekhnitsi. [Study of impulse automation systems in agritechnics]. *Agricultural Production Technologies*, № 42, 131–142. [in Ukrainian].

5. Shuchart H. (2004). *Industrial Mixing: Theory and Practice*. Wiley-VCH Verlag, 196. The Herrmann. [in English].

6. Litvinenko P. (2012). Inzhektiine zmishuvannia u fertyhatsiinykh systemakh: porivnialne doslidzhennia ezhektoriv ta statychnykh zmishuvachiv. [Injection mixing in fertigation systems: a comparative study of ejectors and static mixers]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, t. 17. № 4. 315-329. [in Ukrainian].

7. Wurzel A.F. (2011). *Engineering Calculations for Flow Mixers: Process Performance and Efficiency*. CRC Press, 112. USA [in English].

8. Halatov A.A. (2015). Doslidzhennia zakruchuvannia potoku u tsylindrychnykh zmishuvachakh. [Studies of Flow Twisting in Cylindrical Mixers]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, t. 54. № 6. 702-718. [in Ukrainian].

#### ANALYSIS OF THEORETICAL STUDIES OF DEVICES FOR DOSING AND MIXING NUTRIENT SOLUTIONS

*Fertigation systems play an important role in greenhouse crop production, which allow combining irrigation and fertilization processes, providing optimal plant nutrition. The main task of such systems is accurate dosing and uniform mixing of nutrient solutions, including different types of fertilizers, with water. Fertigation*



technology makes it possible to significantly reduce the loss of water and fertilizers, as well as to increase the efficiency of their use at various stages of plant growth. However, the effectiveness of these systems depends on the quality of the mixing and dosing devices, which must ensure the uniform distribution of nutrients in the solution.

Today, there are different designs of mixers for the preparation of nutrient solutions: mechanical mixers with moving elements and static mixers that use hydraulic flows for mixing. Mechanical mixers are suitable for solid and hard-to-dissolve fertilizers, but their operation is complicated by the presence of moving parts. Static mixers are easier to use and have no moving parts, making them efficient and reliable for fertigation systems.

The analysis of theoretical studies of devices for dosing and mixing nutrient solutions, in particular, jet mixers that work according to the

static principle, has been carried out. The considered devices for preparing liquid mixtures are of the ejector type, on the basis of which many modern systems are built. The main attention is paid to the calculations of the optimal geometrical parameters of jet dispensers-mixers. The theoretical studies of most scientists are focused on determining the injection coefficient — as a key parameter that determines the efficiency of mixing and dosing. Theoretical approaches also include models of turbulent particle transport and semi-empirical equations to evaluate mixing quality. However, the issue of practical assessment of the quality of multi-component mixer-dispenser mixtures remains insufficiently studied.

**Keywords:** fertigation, mixing, hydroponics, dispenser, fertilizers, fertilizer application, nutrient solution, geometric parameters, greenhouse, agriculture.

#### Відомості про авторів

**Стаднік Микола Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380972830537, [anisimov@vsau.vin.ua](mailto:anisimov@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3349-1630>).

**Бабін Ігор Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [ihorbabyn@gmail.com](mailto:ihorbabyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Луц Павло Михайлович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Ріпа Сергій Володимирович** – аспірант кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [xsergx21@gmail.com](mailto:xsergx21@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8520-3338>).

**Stadnik Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electrical Mechanics of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [anisimov@vsau.vin.ua](mailto:anisimov@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3349-1630>).

**Babyn Ihor** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [ihorbabyn@gmail.com](mailto:ihorbabyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Luts Pavlo** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Ripa Serhiy** – postgraduate student of the Department of Agricultural Machinery and Equipment of Vinnytsia National Agrarian University 3 Sonyachna (St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [xsergx21@gmail.com](mailto:xsergx21@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8520-3338>).