



УДК 621.43.001

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-2

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ ЛОПАТЕВОГО ЗМІШУВАЧА НА ТУРБУЛЕНТНІСТЬ ТА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗМІШУВАННЯ РІДИНИ**

**Бурлака Сергій Андрійович, Ph.D.**, старший викладач  
**Купчук Ігор Миколайович, к.т.н.**, доцент  
**Шаповалюк Сергій Олександрович**, асистент  
**Черниш Микола Васильович**, магістр  
Вінницький національний аграрний університет

**Serhii Burlaka, Ph.D.**, Senior lecturer  
**Ihor Kupchuk**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Serhii Shapovaliuk**, Assistant  
**Mykola Chernysh**, Master  
Vinnytsia National Agrarian University

*Турбулентне змішування рідини є важливим аспектом багатьох промислових та технологічних процесів, де ефективно перемішування різних компонентів має першорядне значення для досягнення бажаних результатів. Оптиміальне змішування може покращити якість продукції, забезпечити єдність складних реакцій та знизити час виконання процесів. У зв'язку з цим, вивчення та розуміння впливу геометрії змішувача на характеристики турбулентного потоку стає актуальною задачею наукових досліджень.*

*Актуальність дослідження пояснюється широким застосуванням змішувачів в промислових і технологічних процесах, де ефективність змішування має вирішальне значення для досягнення оптимальних результатів. У роботі були використані методи експериментального та чисельного моделювання турбулентного потоку у різних геометричних конфігураціях лопатевих змішувачів. Для кількісного оцінювання турбулентних характеристик були використані показники, такі як інтенсивність турбулентності, градієнт тиску та коефіцієнт змішування рідини.*

*Отримані результати демонструють, що геометрична конфігурація лопатевого змішувача має значний вплив на формування турбулентного потоку. Деякі геометричні параметри змішувача можуть сприяти підвищенню інтенсивності змішування рідини, тоді як інші можуть знижувати його ефективність.*

*Наукові результати можуть бути корисними для проектування оптимальних лопатевих змішувачів для конкретних промислових задач, що вимагають інтенсивного змішування рідини. Застосування оптимізованих змішувачів може сприяти підвищенню продуктивності процесів, економії енергетичних ресурсів та покращенню якості продукції.*

**Ключові слова:** турбулентність, лопатевий змішувач, інтенсивність змішування, експериментальне моделювання, чисельне моделювання.

**Ф. 4. Рис. 5. Табл. 1. Літ. 10.**

---

**1. Постановка проблеми**

Лопатеві змішувачі використовуються в різних промислових галузях, таких як хімічна, петрохімічна, фармацевтична, харчова та інші. Проте, хоча існує велика кількість досліджень, присвячених турбулентному змішуванню рідини, досі не всі аспекти взаємозв'язку між геометрією лопатевого змішувача та турбулентними характеристиками були достатньо з'ясовані та систематично досліджені.

Одним із ключових елементів змішувача, що впливає на характеристики турбулентного потоку та інтенсивність змішування рідини, є його геометрія. Геометричні параметри лопатевого змішувача, такі як форма лопаток, їх довжина, кут нахилу, а також конфігурація змішувача в цілому, можуть суттєво впливати на процеси турбулентного перемішування рідини [1].

Незважаючи на велику кількість досліджень у галузі турбулентного змішування, питання впливу геометрії лопатевого змішувача на характеристики турбулентного потоку та інтенсивність змішування рідини залишається недостатньо дослідженим. Відомо, що різні геометричні параметри



можуть змінювати структуру турбулентного потоку, але точні зв'язки та закономірності між ними та турбулентними характеристиками залишаються не повністю з'ясованими.

Таким чином, головна проблема, яку вирішує дана стаття, полягає у системному аналізі впливу геометрії лопатевого змішувача на турбулентність та інтенсивність змішування рідини. Існуючі дослідження підкреслюють важливість оптимізації геометричних параметрів змішувача для досягнення кращих результатів, але не вистачає повного розуміння взаємозв'язку між цими параметрами та турбулентним режимом.

Для вирішення поставленої проблеми, автори статті використовують експериментальний підхід, проводять чисельне моделювання та здійснюють системний аналіз отриманих результатів. Очікується, що отримані висновки та знання допоможуть оптимізувати дизайн лопатевих змішувачів, що забезпечить підвищення ефективності промислових процесів, зниження енергетичних витрат та покращення якості продукції [2].

---

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

---

Дослідження в цій області включають експериментальні, теоретичні та чисельні підходи. Експериментальні дослідження часто проводяться з використанням фізичних моделей лопатевих змішувачів у лабораторних умовах. Ці експерименти дозволяють виміряти характеристики турбулентності та інтенсивності змішування в залежності від різних параметрів геометрії змішувача [3].

Теоретичні підходи базуються на аналітичних методах та моделях турбулентності, які дозволяють отримати аналітичні або напіваналітичні розв'язки для течій у змішувачах з різною геометрією [4].

Чисельні симуляції, такі як метод обмеженого об'єму (CFD), широко використовуються для дослідження турбулентних потоків у змішувачах. Вони дозволяють врахувати складні геометрії та взаємодію турбулентних потоків з поверхнею лопаток змішувача [5].

Результати досліджень показують, що геометрія лопатевого змішувача суттєво впливає на характеристики турбулентності та інтенсивність змішування рідини. Певні геометричні параметри, такі як форма лопаток, кут нахилу, розташування та розмір лопаток, можуть забезпечити більш ефективне змішування та знизити турбулентність [6].

Практичне застосування досліджень з впливу геометрії лопатевого змішувача може включати оптимізацію процесів змішування, зменшення енерговитрат та підвищення продуктивності в промислових системах [7].

---

## 3. Мета досліджень

---

Метою досліджень є вивчення впливу різних геометричних параметрів лопатевого змішувача на характеристики турбулентності та інтенсивність змішування рідини.

---

## 4. Виклад основного матеріалу

---

З точки зору гідродинаміки, механічне перемішування рідини відіграє важливу роль у різних промислових процесах. При повільному русі твердого тіла в рідині з високою в'язкістю у прикордонному шарі, який прилягає до поверхні тіла, утворюється тонкий прикордонний шар, що залежить від форми і розмірів тіла, швидкості руху та властивостей рідини.

При значних швидкостях руху тіла, прикордонний шар відокремлюється від поверхні, зокрема від його країв, що рухаються найшвидше, і створюється турбулентний слід за тілом. Це призводить до збільшення опору руху тіла.

При обертанні механічної мішалки, найбільша швидкість спостерігається на її периферії, і за рівнянням Бернуллі утворюється зона зниженого статичного тиску. Це спричиняє рух рідини від центру до периферії, створюючи радіальні струмені, які забезпечують інтенсивне перемішування рідини.

Описати математично такий рух рідини є складним, і для аналізу гідродинаміки перемішування використовується критерій Рейнольдса. Змішувачі широко використовуються в машинобудуванні, як при виготовленні, так і при експлуатації різних систем. Потужність, витрачена на змішування, є важливою величиною, що потребує розрахунку, і вона залежить від перепаду тиску на мішалці, площі розподіленого тиску та її кутової швидкості.

Необхідно розрахувати важливий параметр - потужність, яка витрачається на змішування,



позначена як  $N$ , Вт. Ця потужність залежить від кількох факторів, зокрема від перепаду тиску на лобовій і тильній частині мішалки ( $\Delta P$ , Па), площі розподіленого тиску ( $S$ , м<sup>2</sup>) та кутової швидкості ( $\omega_{\text{кут}}$ , м/с), яка розраховується за допомогою формули (1) [8-10]:

$$\omega_{\text{кут}} = \pi d_M n = d_M n, \quad (1)$$

$$N = \Delta P S (nd) \quad (2)$$

де  $n$  – частота обертів мішалки, об/с;  $d$  – діаметр мішалки, м.

Площа розподілу сил пропорційна діаметру в квадраті ( $S = d^2$ ). Отже, перепад тиску визначається із залежності (3) [10]:

$$\Delta P = \frac{N}{nd^3}. \quad (3)$$

Для подальших розрахунків використовуємо модифікований (для змішувачів) критерій Рейнольдса  $Re_M$ .

$$Re_M = \frac{d_m \omega_{\text{кут}} \rho}{\mu} = \frac{nd_m^2 \rho}{\mu}. \quad (4)$$

При виконанні розрахунків необхідно ураховувати фізико-механічні характеристики палив і їх сумішей, а також особливості конструкції змішувача. З використанням виразів (1–4) визначаємо значення гідродинамічної подібності фільтра-змішувача в залежності від динамічної в'язкості, густини та вмісту біопалива. Отримані розрахункові дані наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Дані гідродинамічної подібності фільтра-змішувача в залежності від динамічної в'язкості, густини та вмісту біопалива

Критерій $Re_M$	Динамічна в'язкість при $T=323\text{K}$ , Па с	Густина $\rho$ при $T=323\text{K}$ , кг/м <sup>3</sup>	Вміст біопалива (Б) у дизельному паливі (Д), %
373357	0,003196	832,2	5Б/95Д
352713	0,003392	834,4	10Б/90Д
334325	0,003588	836,6	15Б/85Д
317841	0,003784	838,8	20Б/80Д
302981	0,00398	841	25Б/75Д
289516	0,004176	843,2	30Б/70Д
277259	0,004372	845,4	35Б/65Д
266053	0,004568	847,6	40Б/60Д
255769	0,004764	849,8	45Б/55Д
246298	0,00496	852	50Б/50Д
237547	0,005156	854,2	55Б/45Д
229437	0,005352	856,4	60Б/40Д
221900	0,005548	858,6	65Б/35Д
214877	0,005744	860,8	70Б/30Д
208318	0,00594	863	75Б/25Д
202178	0,006136	865,2	80Б/20Д
196418	0,006332	867,4	85Б/15Д
191004	0,006528	869,6	90Б/10Д
185905	0,006724	871,8	95Б/5Д
181096	0,00692	874	100Б/0Д

При здійсненні механічного перемішування відрізняють два режими: ламінарний та турбулентний. Ламінарний режим ( $Re_M < 30$ ) характеризується неінтенсивним перемішуванням, при якому рідина спокійно обтікає краї лопаті мішалки, захоплюється лопатками та обертається разом з ними. У ламінарному режимі перемішується лише та частина рідини, яка безпосередньо межує з ротором змішувача (Рис. 1).

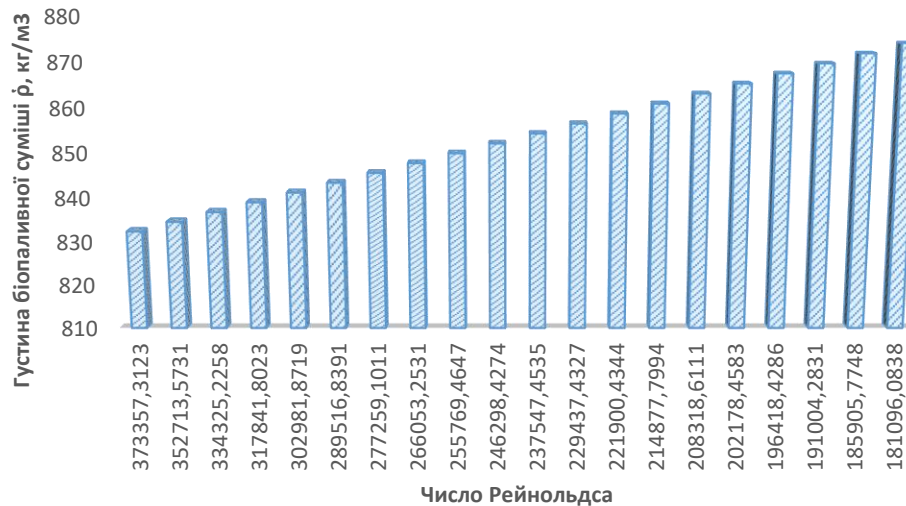


Рис. 1 Зміна числа Рейнольдса  $Re_M$  в залежності від густини біопаливної суміші  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

При збільшенні частоти обертання мішалки, зростає опір середовища через утворення турбулентного сліду та турбулізацію прикордонного шару у просторі за рухомими лопатками. У таких умовах формується вимушена циркуляція, що забезпечує тривимірне переміщення рідини в апараті. Зазвичай, це відповідає числам Рейнольдса в діапазоні від  $10^2$  до  $10^3$ .

При досягненні області розвиненої турбулентності ( $Re_M > 10^4$ ) відбувається інтенсивне перемішування рідини. Зазначені критичні значення числа Рейнольдса є наближеними та залежать від конструкції та розмірів ротора та апарату загалом (Рис. 2).

Під час оптимізації конструктивних параметрів змішувача, досліджуються різні розміри лопатей (діаметри) від 0,015 метра до 0,075 метра. Оскільки пристрій базується на фільтрі тонкої очистки двигуна Д-240, головним параметром оптимізації є геометричні розміри ротора Савоніуса, зокрема діаметр лопаті, що враховується при розрахунках та значно впливає на роботу змішувача. Основним показником ефективності роботи обрано число Рейнольдса.

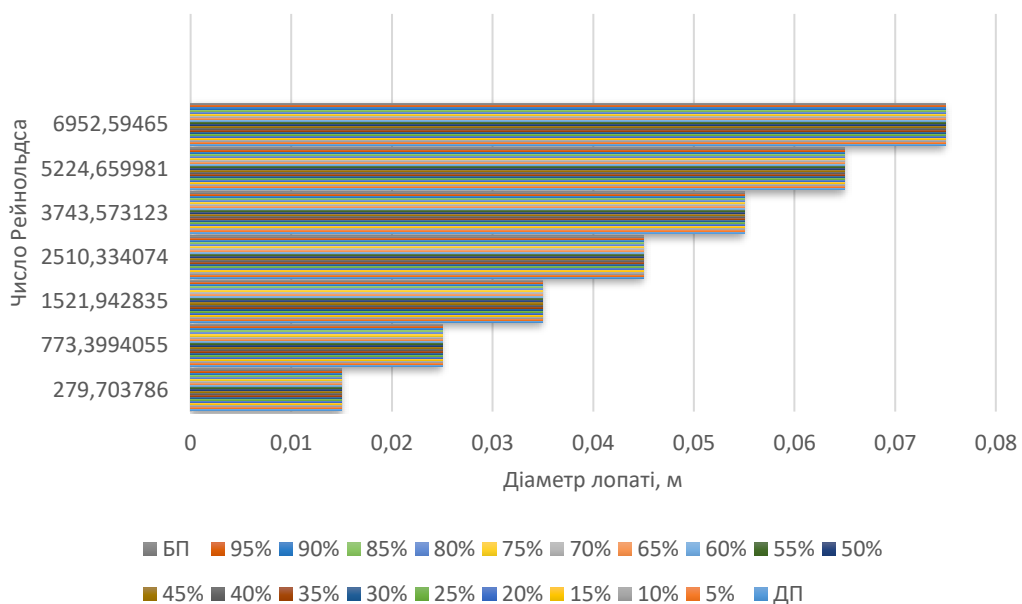
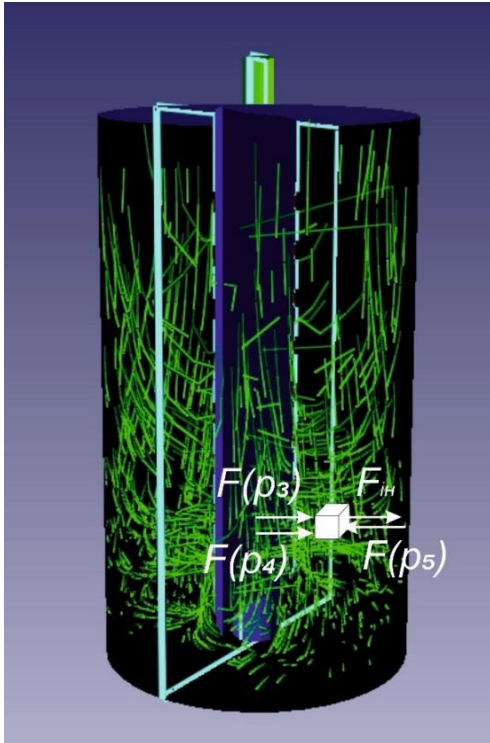


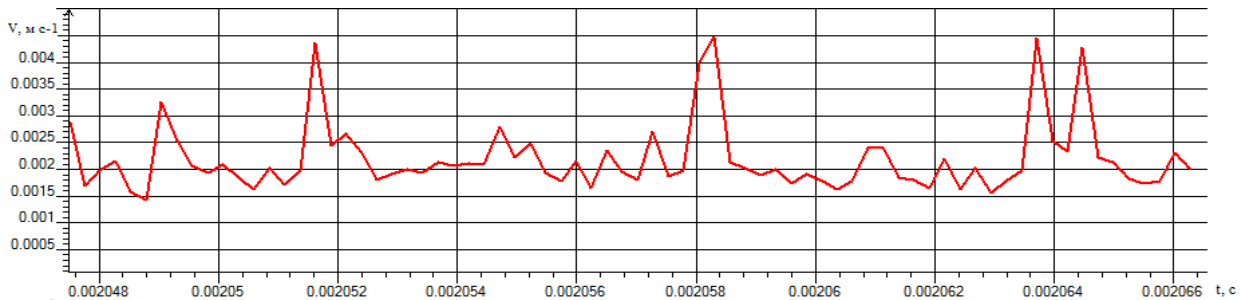
Рис. 2 Показники числа Рейнольдса різних видів палива в залежності від діаметра лопаті змішувача



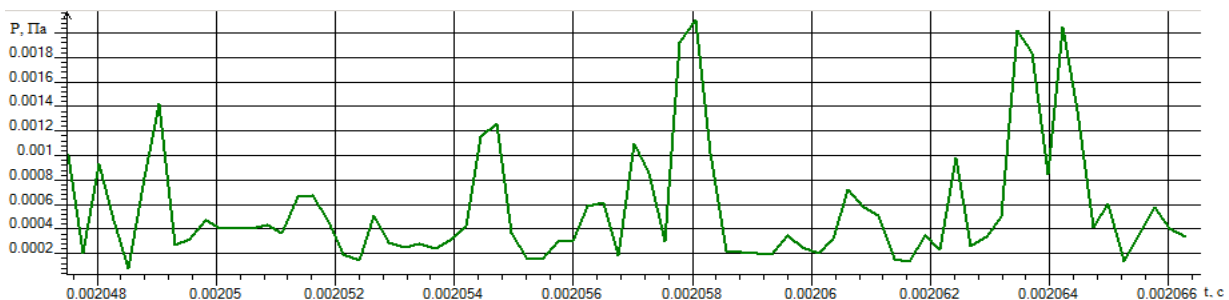
**Рис. 3. Моделювання руху потоків рідини у змішувачі програмою FlowVision**

Аналізуючи отримані графіки, можна зробити висновок, що область розвинутої турбулентності ( $Re_M > 10^4$ ) досягається при діаметрі лопаті 0,015 м. Однак, для досягнення покращеної ефективності, плавності роботи та інтенсивного змішування, найбільш конструктивно вигідним є діаметр 0,055 м. Вибір геометричних розмірів змішувача здійснений з урахуванням типу палива, конструктивних особливостей та розрахункових даних. Збільшення розмірів лопатей (понад 0,075 м) призводить до зниження їх міцності, ускладнення виготовлення та зменшення швидкості обертання, що в свою чергу знижує продуктивність змішувача в цілому.

З метою підтвердження адекватності проведених розрахунків, було виконано моделювання процесу змішування з використанням програми FlowVision. Запропонована модель змішувача була використана для моделювання робочої порожнини пристрою, який був заповнений рідиною, з вказанням всіх вихідних, вхідних отворів та фізико-хімічних характеристик палива (Рис. 3-5).



**Рис. 4. Залежність швидкості потоку частинок рідини від часу**



**Рис. 5. Залежність перепадів тиску рідини від часу**

Як можна спостерігати, відбувається інтенсивне турбулентне змішування потоків рідини, що підтверджує адекватність проведених розрахунків. Крім того, отримано залежності швидкості та тиску робочої рідини в змішувачі від часу за допомогою програми.

## 5. Висновки

За допомогою експериментальних, теоретичних та чисельних підходів, вчені з'ясували, що різні параметри геометрії лопатевого змішувача, такі як форма лопаток, кут нахилу, їх розмір та



розташування, можуть змінювати розподіл турбулентності в потоці рідини та інтенсивність змішування. Оптимізація геометрії змішувача може покращити якість та ефективність процесів змішування, а також знизити витрати енергії та ресурсів.

Дослідження підтверджують, що розвинена турбулентність, досягається при діаметрі лопати 0,015 м, що може бути корисним для певних застосувань, де потрібен високий рівень турбулентності. Однак, для забезпечення оптимальної ефективності, гладкої роботи та інтенсивного змішування, найбільш конструктивно вигідним виявився діаметр лопати 0,055 м. Це може бути компромісом між досягненням ефективного змішування та збереженням стабільності та економічності.

Вибір геометричних розмірів змішувача здійснений з урахуванням типу палива, конструктивних особливостей та розрахункових даних. Це підкреслює важливість збалансованого підходу при проектуванні змішувачів для конкретних застосувань. Збільшення розмірів лопатей понад 0,075 м може призвести до зниження міцності, ускладнення виготовлення та зменшення швидкості обертання, що негативно позначиться на продуктивності змішувача в цілому.

#### Список використаних джерел

1. Калетник Г. М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України: навч. посібник. К.: Аграрна наука, 2010. 327 с.
2. Гунько І. В., Бурлака С. А. Математичне моделювання роботи системи живлення дизельного двигуна працюючого на біопаливі з дросельним регулювання складу паливної суміші. *The scientific heritage*. 2020. № 50. С. 34–39.
3. Murugesan A., Subramanian R., Nedunchezian N. Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines. *Renew sust energy rev*. 2009. P. 653–662.
4. Tokarchuk D. M., Pryshliak N. V., Tokarchuk O. A., Mazur K. V. Technical and economic aspects of biogas production at a small agricultural enterprise with modeling of the optimal distribution of energy. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 61 (2). P. 339–349.
5. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник. К.: Вища освіта. 2004. 544с.
6. Кравчука В. І., Грицишина М. І., Ковалю С. М. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки. К.: Аграрна наука. 2004. 396 с.
7. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus*. 2020. Vol. XXXI (1). P. 10–16.
8. Бурлака С. А., Явдик В. В., Єленич А. П. Методи досліджень та способи оцінки впливу палив з відновлюваних ресурсів на роботу дизельного двигуна. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 2 (271). С. 212–220
9. Малаков О. І., Бурлака С. А., Михальова Ю. О. Математичне моделювання та основи конструювання вібраційних змішувачів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 5 (277). С. 30–33.
10. Бурлака С. А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1 (305). С. 140–145.

#### References

- [1] Kaletnik, H.M. (2010). Biopalyva: efektyvnist' yikh vyrobnytstva ta spozhyvannya v APK Ukrainy:navch. posibnyk. K: Ahrarna nauka. [In Ukrainian].
- [2] Hun'ko, I.V., & Burlaka, S.A. (2020). Matematychnе modelyuvannya roboty systemy zhyvlennya dyzel'noho dvyhuna pratsyuyuchoho na biopalyvi z drosel'nym rehulyuvannya skladu palyvnoyi sumishi. *The scientific heritage*, 50, 34–39. [in Ukrainian].
- [3] Murugesan, A., Subramanian, R., Nedunchezian, N. (2009). Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines. *Renew sust energy rev*. 653–662. [in English].
- [4] Tokarchuk, D.M., Pryshliak, N.V., Tokarchuk, O.A., Mazur, K.V. (2020). Technical and economic aspects of biogas production at a small agricultural enterprise with modeling of the optimal distribution of energy. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 61(2), 339–349. [in English].
- [5] Voytyuk, D.H., Dubrovin, V.O., & Ishchenko, T.D. (2004). Sil's'kohospodars'ki ta melioratyvni mashyny: Pidruchnyk. K.: Vyshcha osvita. [in Ukrainian].
- [6] Kravchuka, V.I., Hrytsyshyna, M.I., & Kovalya, S.M. (2004). Suchasni tendentsiyi rozvytku konstruktsiy sil's'kohospodars'koyi tekhniky. K.: Ahrarna nauka. [in Ukrainian].



- [7] Bulgakov, V., Olt, J., Kuvachov, V. (2020). A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus*, XXXI (1), 10–16. [in English].
- [8] Burlaka, S.A., Yavdyk, V.V., Yelenych, A.P. (2019). Metody doslidzhen' ta sposoby otsinky vplyvu palyv z vidnovlyuvanykh resursiv na robotu dyzel'noho dvyhuna. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, 2 (271). 212–220. [in Ukrainian].
- [9] Malakov, O.I., Burlaka, S.A., Mykhal'ova, Y.O. (2019). Matematychni modelyuvannya ta osnovy konstruyuvannya vibratsiynykh zmishuvachiv. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, 5 (277). 30–33. [in Ukrainian].
- [10] Burlaka, S.A. (2022). Alhorytm funktsionuvannya mashynno-traktornoho ahrehatu z vykorystannyam systemy zhyvlennya zi zmishuvachem palyv. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, 1 (305). 140–145. [in Ukrainian].

#### ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE BLADE MIXER ON THE TURBULENCE AND INTENSITY OF LIQUID MIXING

*Turbulent fluid mixing is an important aspect of many industrial and technological processes where efficient mixing of various components is of paramount importance to achieve the desired results. Optimal mixing can improve product quality, ensure the unity of complex reactions, and reduce process lead times. In this regard, the study and understanding of the influence of the geometry of the mixer on the characteristics of the turbulent flow becomes an urgent task of scientific research.*

*The relevance of the study is explained by the wide application of mixers in industrial and technological processes, where the efficiency of mixing is crucial for achieving optimal results.*

*The work used methods of experimental and numerical modeling of turbulent flow in various geometric configurations of blade mixers. Indicators such as turbulence intensity, pressure gradient, and fluid mixing ratio were used to quantify the turbulent characteristics.*

*The obtained results demonstrate that the geometric configuration of the blade mixer has a significant effect on the formation of the turbulent flow. Some geometric parameters of the mixer can contribute to increasing the intensity of liquid mixing, while others can reduce its efficiency.*

*Scientific results can be useful for designing optimal paddle mixers for specific industrial tasks that require intensive liquid mixing. The use of optimized mixers can help increase process productivity, save energy resources, and improve product quality.*

**Key words:** turbulence, blade mixer, mixing intensity, experimental modeling, numerical simulation.

**F. 4. Fig. 5. Table. 1. Ref. 10.**

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Бурлака Сергій Андрійович** – Ph.D., старший викладач кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>).

**Купчук Ігор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Шаповалиук Сергій Олександрович** – асистент кафедри Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: shapovaliuk sergii@vsau.vin.ua)

**Черниш Микола Васильович** – магістр інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: budova23@ukr.net).

**Serhii Burlaka** – Ph.D., Senior lecturer of the Department of "Technological Processes and Equipment of Processing and Food Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>).

**Ihor Kupchuk** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380978173992, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Serhii Shapovaliuk** – Assistant of the department of machines and equipment of agricultural production of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: shapovaliuk sergii@vsau.vin.ua).

**Mykola Chernysh** – Master of the Engineering and Technology Faculty of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: budova23@ukr.net).