

УДК 664.653.1

**І. Стадник, канд. техн. наук; В. Федів**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **РОЗРАХУНОК КОЛОВОЇ ШВИДКОСТІ В ТІСТОМІСИЛЬНІЙ МАШИНІ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ**

*Наведено результати експериментальних досліджень, проведених на експериментальній моделі тістомісильної машини, і теоретичні розрахунки колової швидкості та крутного моменту, створених спіральним місильним органом, геометрична форма якого у поперечному перерізі є колом і плавником дельфіна. Використано методику гідродинаміки перемішування (при турбулентному та ламінарному режимі) на рідинах, що дозволяє обґрунтувати параметри даних місильних органів шляхом порівняння результатів розрахунків з результатами експериментальних досліджень. Така попередня методика сприяє знайденню основних закономірностей і визначенню раціональних параметрів.*

**I. Stadnyk, V. Fediv**

## **CALCULATION OF THE PERIODICAL OPERATION OF THE ANGULAR VELOCITY IN DOUGH MIXER**

*The results of the experiments that were performed on the prototype of the dough mixer and the theoretical calculations of the angular velocity and the winding moment that are made by the spiral shaft mixer, geometrical form of which in the cross-cut is a circle and dolphin's flipper, are given. The methodology of the hydrodynamics of mixing (in case of turbulent and laminar regimes) on liquids is set that will help to ground the parameters of the giving shaft mixer (performed on the prototype of dough mixer) by means of comparison of the results and calculations with the results of the experiments. It is proved that this methodology helps to find its main regularities and define the rational parameters.*

### **Умовні позначення**

- $M_{\text{корп}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дн}}$  – момент опору місильної камери, Н·м;  
 $M_{\text{кр}}$  – крутний момент, Н·м;  
 $M_{\text{ст}}, M_{\text{дн}}$  – момент опору на стінках і днищі місильної камери, Н·м;  
 $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  
 $u(r)$  – швидкість обтікання дільниці місильного органу на радіусі  $r$ , м/с;  
 $\zeta_{\text{л}}$  – коефіцієнт гідравлічного опору місильного органу (лобовий опір);  
 $\omega_0$  – кутова швидкість місильного органу, рад/с;  
 $v(r)$  – колова швидкість рідини на радіусі  $r$ , м/с;  
 $r$  – радіус, м;  
 $r_0$  – радіус місильного органу, м;  
 $r_{\text{вн}}$  – радіус внутрішніх кромek місильного органу, м;  
 $Z_{\text{м}}$  – число місильних органів на валу, шт;  
 $\zeta_{\text{м}}$  – коефіцієнт опору місильного органу (лобовий опір);  
 $C_f$  – коефіцієнт гідравлічного опору корпусу тістомісильної камери;  
 $v_{\text{ср}}$  – величина середньої швидкості потоку рідини, м/с;  
 $\gamma$  – наповненість рідиною камери.

**Постановка проблеми.** При розробці нових і удосконаленні існуючих тістомісильних машин слід використовувати методи фізичного та математичного моделювання, що при взаємодії кількох процесів дозволяє знайти їх основні закономірності і визначити раціональні параметри процесів і машин.

В зв'язку з цим, одним із необхідних елементів математичного моделювання процесу перемішування є визначення гідродинаміки середньонаправленої течії рідини в корпусі місильної камери тістомісильної машини. Нам відомо, що загальна картина течії і конкретні особливості поля швидкостей суттєво залежать від конструкції

місильного органу, співвідношення розмірів корпусу місильної камери, наявності гальмівних лопатей.

Формування поля швидкостей в потоці рідини визначається, по - перше, силами руху, прикладеними до рідини ззовні, які є причиною внутрішнього руху; по – друге, врівноваженим фактором цих сил гідродинамічним опором на нерухомих поверхнях, що обмежують потік; по – третє, обміном енергією між сусідніми шарами рідини. Таким чином, система рівнянь, що описує поля швидкостей в тістомісильній машині, включає рівняння, які відображають: 1) зв'язок між величиною рухомих сил та гідравлічним опором при русі місильного органу в потоці перемішуючого середовища (тіста); 2) наявність гідравлічного опору на границі потік - корпус тістомісильної камери і залежність величини опору від конструкції та розміру камери, а також від швидкості потоку; 3) механізм обміну енергії або характеру розподілення швидкостей в потоці. Цей підхід відображає найбільш важливі фізичні закономірності формування потоку. Він дозволяє в простій і доступній одиничній формі описати гідродинаміку середньої течії у тістомісильній машині для різних конструктивних варіантів, а також сприяє оцінці оптимальних параметрів процесу замішування при виборі границі швидкості, мірі однорідності поля концентрації і температури [1, 2, 3].

**Аналіз останніх результатів досліджень.** При різних режимах течії перемішування рідин розглядається результат двох одночасно протікаючих процесів: конвективного переносу досить великого об'єму рідини з направленим потоком і прикладених до неї пульсуючих рухів різних масштабів. Напрямок в швидкості цих рухів змінний як в часі, так і в просторі. Тому пульсуючий рух і їх інтенсивність безпосередньо зв'язані із характеристикою середньої течії, так як зміна швидкості елементів рідини по величині і напрямку має хаотичний характер і потік представляє собою сукупність невпорядкованих вихорів різної величини. Невпорядкований характер руху елементів рідини в потоці, постійна наявність в ньому незатухаючих коливань визначає високу інтенсивність обміну енергії, маси та імпульсу в усіх напрямках. Результати досліджень, пов'язаних з визначенням швидкості руху рідини, лобового опору викладені в працях, однак існує чимало питань, що потребують опрацювання для вивчення нових характеристик у запропонованих місильних органах. Використовуючи дані досліджень, проведених Брачинським Л. Н та Багачевим В. І з визначення середньої швидкості течії рідини при перемішуванні без врахування тормозних лопатей [1, 2], а також Стадника І. Я [3], дана робота спрямована на удосконалення нових характеристик середньої течії рідини.

**Мета роботи.** Встановити основні закономірності процесу замішування для двох досліджуваних спіральних місильних органів з покращенням технологічних параметрів і вимог до процесу замішування.

**Результати досліджень.** Дослідження проводилися на експериментальній моделі для кожного місильного органу.

Експериментальна модель представляє собою місильну камеру 1 змінних спіральних місильних органів [5,6], які мають різний крок та геометричну форму в поперечному перерізі 2 привода 3. Корпус місильної камери виготовлений із нержавіючої сталі, де встановлено прозорі вставки для спостереження за рухом рідини (рисунок 1).

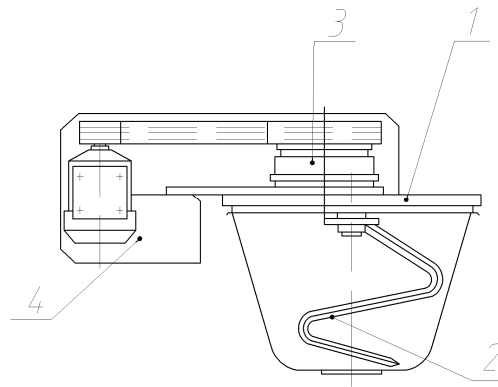


Рисунок 1 - Експериментальна модель тістомісильної машини: 1 - місильна камера; 2 – спіральний місильний орган; 3 – привід; 4 – станина

Визначалась динаміка руху рідини на різних швидкостях обертання робочих органів. У рідину додавалися дрібні частинки для спостереження та фіксації траєкторії швидкості по всій поверхні місильної камери. При швидкості обертання 200 об/хв зроблено фотографію траєкторії руху швидкостей рідини за час експозиції 1/15 с. Як бачимо із рисунка 2, лінії траєкторії руху мають різні довжини відносно осі обертання місильного органу, що свідчить про різноманітну швидкість між шарами.

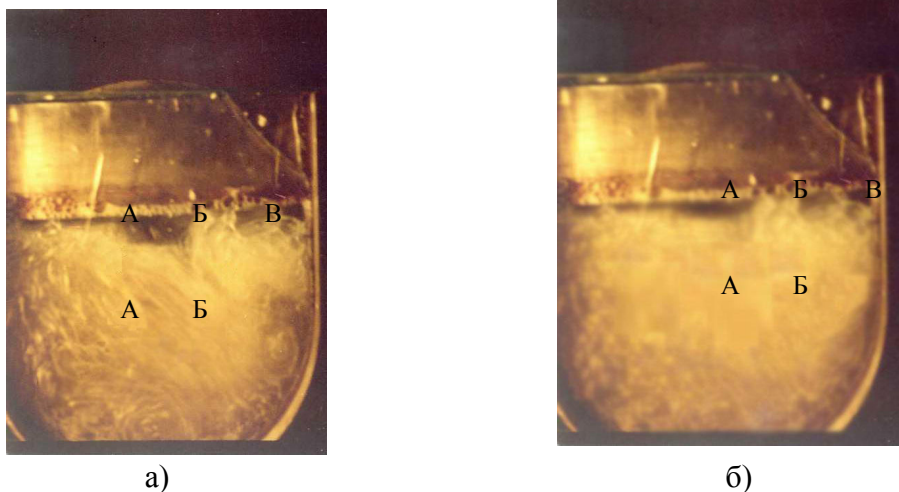


Рисунок 2 - Траєкторія руху швидкостей рідини утворена спіральним місильним органом: а) поперечне січення плавник - дельфіна; б) поперечне січення - коло

Найменше тертя поверхні розподілу цих шарів спостерігається біля стінки місильної камери (точки А) для наших місильних органів. Слід відзначити, що для спірального місильного органу (в поперечному перерізі плавник - дельфіна) поверхня більш хвиляста. Ближче до осі місильних органів спостерігаються чіткі впадини і гребені двох шарів, які контактують і сприяють подальшому збільшенню хвилястості. Ці явища повторюються в більш різкій формі, і поверхня розподілу сил стає несиметричною (точки Б). Біля осі місильного органу хвилі перекидаються і утворюють вихори (точки В), які зриваються з країв місильного органу, змішуються із рідиною, розміщеною за місильним органом, завихрюють її і створюють зону турбулентного руху рідини. Як бачимо із рис 2, вихри безперервно зустрічаються та розбиваються, рідина енергійно перемішується, затягуючи за собою частинки твердих тіл (наявність у рідині пофарбованих твердих частинок).

На основі досліджень ми бачимо, що місильний орган при обертанні в рідині витісняє її і надає деяку швидкість. При цьому місильний орган переборює гідравлічний опір (лобовий опір), тертя об'єму, витісняє нерухому частинку маси та інші опори. Тому для уточнення кращої роботи, яка витрачається на перемішування

рідини при опорі, ми, крім досліджень в експериментальній моделі, проводили і теоретичне обґрунтування.

Задача нашого теоретичного обґрунтування полягало у визначенні колової швидкості та меридіальної для двох спіральних місильних органів.

Багаточисельні дослідження доводять, що дві із трьох просторових складових швидкостей (радіальна і вісьова) в декілька разів менші від колової швидкості, значення якої майже не змінюється по висоті місильної камери і практично не залежить від висоти розміщення місильного органу [2].

Зміну колової швидкості  $v$  по радіусу  $r$  найчастіше описують на основі моделі "комбінованого вихору" (рисунок 3).

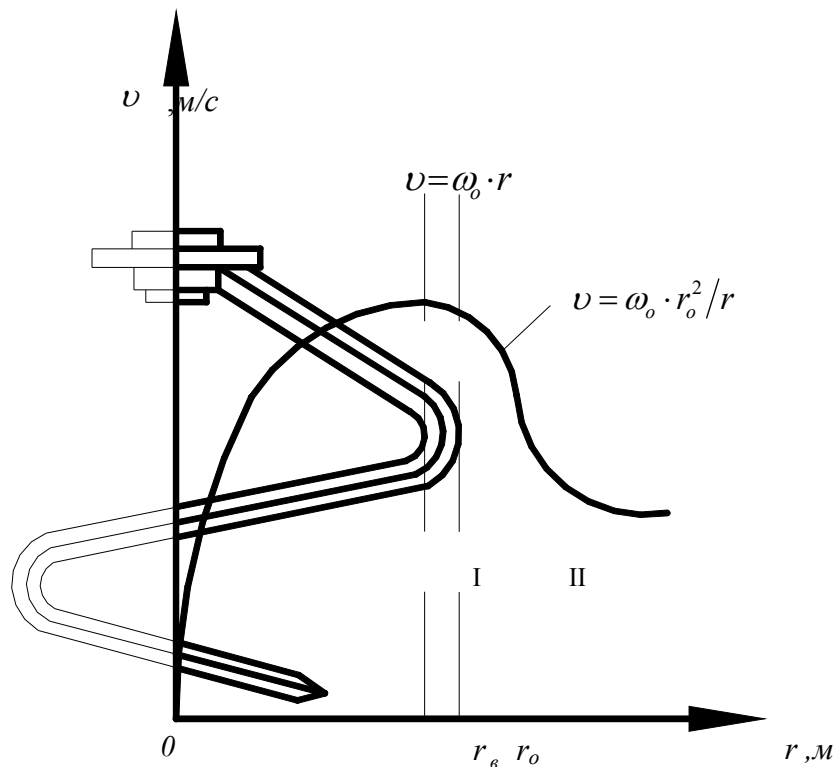


Рисунок 3 - Схема моделі "Комбінованого вихору":  
I – вихрова зона, II – зона потенційної течії

Об'єм рідини при використанні цієї моделі зображується як сукупність об'єму вихрової зони I, в якій кутова швидкість постійна, не змінюється по радіусу і об'єму зони потенційної течії II, для якої характерна зміна швидкості пропорційна радіусу. Для усунення розриву неперервності профілю доповнюють третьою зоною – проміжною, яка розміщена в області максимальної швидкості. Ця якісна модель застосовується на тістомісильних машинах із двома місильними органами. Альтернативний математичний опис течії базується на тому, що при встановленому режимі повинні виконуватися умови рівноваги всіх прикладених до місильного органу сил і моментів.

При обертанні місильного органу відносно осі місильної камери умову рівноваги замішуючої рідини можна виразити у формі рівності крутного моменту, прикладеного до рідини, і моменту опору на стінках і днищі камери:

$$M_{кр} - M_{корп} = 0. \quad (1)$$

Крутий момент на місильному органі виникає в результаті різниці швидкості місильного органу та рідини і може бути визначений за зусиллям, яке діє на нього.

У нашому випадку при обертанні спірального місильного органу до елементарної ділянки прикладеної сили:

$$dP = \zeta_n \frac{\rho u^2(r)}{2} h_n dr. \quad (2)$$

Відповідно крутний момент:

$$dM_{кр} = \zeta_{л} \frac{\rho u^2(r)}{2} h_{л} r dr . \quad (3)$$

Виразимо швидкість обтікання як різницю швидкостей місильного органу і колового опору на радіусі  $r$  :

$$u(r) = \omega_0 r - v(r) . \quad (4)$$

Та введемо позначення:

$$\bar{r} = \frac{r}{r_0} ; \quad \bar{v}(r) = \frac{v(r)}{\omega_0 r_0} .$$

Крутний момент може бути виражений як:

$$M_{кр} = Z_{м} \frac{\zeta_{м} \cdot \rho \cdot \omega_0^4 r_0^4}{2} \int_{\bar{r}_{ен}}^1 [\bar{r} - \bar{v}(\bar{r})]^2 \bar{r} d\bar{r} , \quad (5)$$

$$\bar{r}_{ен} = \frac{r_{ен}}{r_0} .$$

Установлено [1], що для спірального місильного органу, який має коло в поперечному перерізі  $\zeta_{м} = 1,0$ , а в поперечному перерізі плавника дельфіна  $\zeta_{м} = 1,54$ . Момент сил гідравлічного опору на циліндричній стінці тістомісильної камери

$$M_{см} = \pi C_f \rho H R^2 v_{cp}^2 , \quad (6)$$

$$v_{cp} = \frac{1}{R} \int_0^R v(r) dr .$$

Момент опору днища тістомісильної камери  $M_{дн}$  в параметрах від 0 до R із врахуванням нахилу днища та враховуючи, що колова швидкість сконцентрована в центральній частині камери і створює високі дотичні напруження, які є на малих радіусах і приводить до невеликих моментів,

$$M_{дн} = \frac{\pi}{4} \rho C_f R^3 v_{cp}^2 . \quad (7)$$

Сумарний момент корпусу тістомісильної машини:

$$M_{корп} = M_{см} + M_{дн} = \frac{\pi}{4} \gamma C_f \rho \omega_0^2 r_0^5 \bar{R} v_{cp}^2 , \quad (8)$$

$$\bar{v}_{cp} = \frac{C_{cp}}{(\omega_0 r_0)} ; \quad \bar{R} = \frac{R}{r_0} ,$$

$$\gamma = \frac{4H}{R+1} .$$

Коефіцієнт  $C_f$  при турбулентному режимі визначається виразом:

$$C_f = \lambda_t R_e^{0,25} .$$

Коефіцієнт  $\lambda_t$  не залежить від типу місильного органу,  $\lambda$  при  $\bar{R} \geq 2$  постійний і дорівнює 0,095 [3].

Розподілення швидкості в області II (рис. 1.т.А.В і рис.3) може бути приблизно виражена виразом:

$$U = \omega_0 r_0 - v(r_0) .$$

Крутний момент в даному випадку можна визначити:

$$M_{кр} = Z_{м} \zeta_{л} h_{л} Z_{л} b r_0 \frac{\rho u^2}{2} . \quad (9)$$

За проведеною вище методикою розраховувався крутний момент та середня швидкість руху рідини у двох зонах процесу замішування. Співставлення даних

теоретичних розрахунків з результатами експериментального дослідження дало можливість не тільки оцінити придатність даної методики, але також провести порівняльну оцінку. Результати розрахунків досить близькі до даних експериментальних досліджень. Вони свідчать про придатність для проведення розрахунків експериментальної моделі із будь-яким дослідним місильним органом на рідинах, щоб уявно перенести на процес замішування тіста. Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати розрахунків колової швидкості рідини та експериментальних досліджень

Параметри	Експериментальні дослідження		Теоретичні розрахунки	
	коло	Плавник дельфіна		
Крутний момент $M_{кр}$ $кН \cdot м$	0,372	0,219	0,39	0,206
Середня швидкість потоку $v_{cp}$ м/хв	45,4	45,6	43,3	49,6
Момент опору днища $M_{дн}$	0,118	0,106	0,126	0,119
Момент опору на стінці $M_{ст}$	0,123	0,121	0,129	0,126
Момент корпусу $M_{корп}$	0,241	0,227	0,255	0,245

На рисунку 4 наведено графіки залежності профілю колової швидкості від радіусу  $r$  для двох місильних органів, побудовані за результатами розрахунків.

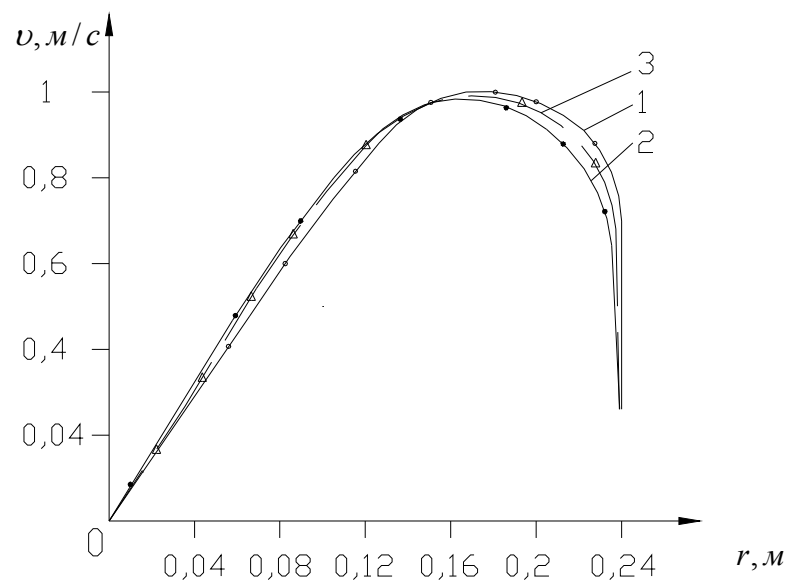


Рисунок 4 - Профіль колової швидкості в тістомісильній машині із спіральним місильним органом: 1 - поперечне січення – коло; 2 - поперечне січення плавник дельфіна; 3 - експериментальні дані

**Висновки.** Отримані результати теоретичних розрахунків і порівняння з результатами досліджень дозволяють зробити висновок про придатність методики для розрахунку середньої швидкості на русі рідини.

Вони можуть використовуватися як складова частина методики розрахунку конструктивних параметрів тістомісильної машини. Отже, найкращі показники в наших

дослідженнях мав спіральний місильний орган в поперечному січенні – плавник дельфіна. Тому його використання на тістомісильній машині буде сприяти кращому процесу замішування при зменшенні енергозатрат.

**Література**

1. Брачинский Л. Н., Бегачев В. И. ТОХВ. - Київ: НУХТ, Т.6, №2. - 1972. - С 260 – 268.
2. Брачинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивания в жидких средах. - Ленинград: Химия, 1984. - 335с.
3. Стадник І. Я Підвищення інтенсивності роботи тарілчастої тістомісильної машини безперервної дії. Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук., - Київ: НУХТ, 2004. – С 87-107.
4. Рейнер М. Деформация и течение. Пер. с англ. под ред. Л. В. Микитина - М.: Гостоптехиздат, 1963. - 374с.
5. Лісовенко О. Г. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв. - Київ: Наукова думка, 2006. - 281с.
6. Деклараційний патент № 34840 Україна. Тістомісильний орган. Стадник І. Я. МПК (2006) А1 F1/ 00 U2008 03375 Бюл №16. - 1с.

Одержано 05.09.2008 р.