

УДК 621.646.1

**І. Я. Стадник, професор, А. В. Жуковський, В. А. Кірічек**

**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна**

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТІСТА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО І КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

**Анотація:** У статті розглянуто методику комп'ютерного моделювання процесу замішування тіста як інструмент для визначення раціональних параметрів технологічного процесу та розроблення відповідного обладнання. Проаналізовано застосування програмного пакета FlowVision, що дозволяє з високою точністю відтворити гідродинамічні процеси, спостерігати за рухом компонентів, виявляти застійні зони та оптимізувати роботу місильних органів. Описано основні рівняння та моделі, що використовуються в обчисленнях, включаючи рівняння Нав'є-Стокса, рівняння енергії та рівняння масоперенесення. Підкреслено важливість моделювання для отримання параметрів, які неможливо виміряти традиційними методами, та для візуального аналізу процесів.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, замішування тіста, FlowVision, гідродинамічні процеси, рівняння Нав'є-Стокса, FlowVision, оптимізація.

**I. Y. Stadnyk, Prof., A. V. Zhukovskiy, V. A. Kirichuk**

## **DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE PARAMETERS OF DOUGH USING MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING**

**Abstract:** The article discusses the methodology of computer modeling of the dough mixing process as a tool for determining the rational parameters of the technological process and developing the appropriate equipment. The application of the FlowVision software package is analyzed, which allows to reproduce hydrodynamic processes with high accuracy, observe the movement of components, identify stagnant zones, and optimize the operation of kneading organs. The main equations and models used in the calculations are described, including the Navier-Stokes equation, the energy equation, and the mass transfer equation. The importance of modeling for obtaining parameters that cannot be measured by traditional methods and for visual analysis of processes is emphasized.

**Keywords:** computer modeling, dough mixing, FlowVision, hydrodynamic processes, Navier-Stokes equations, FlowVision, optimization.

Враховуючи швидкий розвиток і великі можливості сучасної обчислювальної техніки, при розв'язанні завдань визначення раціональних параметрів проведення процесу замішування і подальшого розроблення відповідного обладнання варто користуватися методами комп'ютерного моделювання.

Моделювання дозволяє з меншими затратами часу і матеріальних ресурсів простежити за циклами процесів, що відбуваються в робочій камері, оптимізувати їх, а також отримати числові значення параметрів процесу, які неможливо виміряти за допомогою наявних приладів. Кінцевою метою досліджень є визначення необхідних параметрів проведення процесу замішування [1].

На даному етапі розвитку математичного та комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів з'явилася можливість з великою точністю відтворити процеси, що відбуваються під час замішування: спостерігати траєкторію руху компонентів, визначати застійні зони, порівнювати ефективність роботи різних місильних органів. Для дослідження основних закономірностей процесу замішування обрано програмний пакет для персональних комп'ютерів у середовищі FlowVision.

Геометрію було побудовано в САПР AutoCAD 2022, експортовано в формат STL, який використовується FlowVision. Для обчислень було застосовано модель течії з вільною поверхнею та моделі масопереносу змішуваних компонентів [2,3].

Модель використовує функцію VOF, що набирає значення 0 (газ) та 1 (рідина). Вільна поверхня є набором фасеток, що відтинають розрахункову область. Обчислюються всі комірки з рідиною. У моделі використовуються такі рівняння:

1. Рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \nabla(VV) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu + \mu_i)[\nabla V + (\nabla V)^T] + \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g$$

$$\nabla V = 0.$$

де:  $\rho$  - густина тіста;  $\mu$  - динамічна вязкість тіста;  $\mu_i$  - турбулентна динамічна вязкість тіста;  $\omega$  - кутова швидкість обертання;  $\tau$  - час замішування;  $V$  - швидкість руху компонентів;  $\rho_{hyd}$  - початкова густина тіста;  $\nabla$  - оператор Гамільтона;  $\left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g$  - векторне поле масових сил;  $[\nabla V + (\nabla V)^T]$  - оператор Лапласа.

2. Рівняння енергії:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{P_{rt}} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho},$$

де:  $C_p$  - питома теплоємність тіста;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності;  $P_{rt}$  - число Прандтля;  $Q$  - кількість тепла;  $V$  - швидкість теплоносія;  $h$  - ентальпія

3. Рівняння перенесення функції заповнення F:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0,$$

де:  $F$  - степінь заповнення тістом робочої камери;  $t$  - час процесу

4. Рівняння масоперенесення змішуваних компонент:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_t}{S_{c_t}} \right) \nabla C \right),$$

де:  $S$  - число Шмідта;  $S_{c_t}$  - турбулентне число Шмідта;  $C$  - масова концентрація.

На етапі формування завдання задаються умови контактної взаємодії матеріалу з обладнанням (дані про геометрію поверхонь тертя і коефіцієнт тертя), значення структурно-механічних характеристик тіста, що деформується.

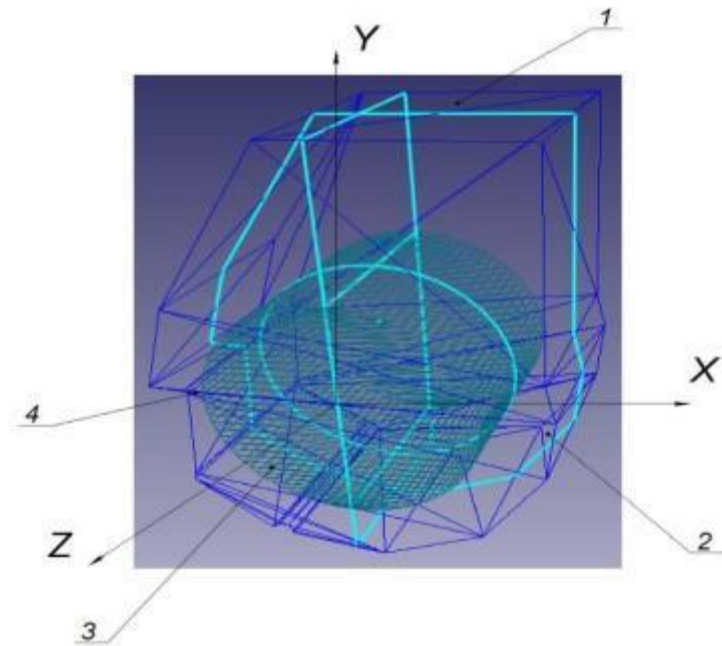


Рис. 1. Модель безлопатевої дискретної тістомісильної машини:  
1 – горловина завантаження; 2 – корпус робочої камери; 3 – безлопатевий робочий орган; 4 – пасивний вібраційний пристрій (ПВП)

На рисунку 1. наведено технологію фасетного розділення геометрії пілотного зразка, що дозволяє імпортувати геометрію для візуальних досліджень. На вузлові точки пристінних елементів накладені граничні умови – на вертикальних поверхнях задані обмеження в переміщеннях у напрямку  $x$  (відповідно  $u_x = 0$ ), на похилих – обмеження у переміщенні в напрямку  $xu$  і кут нахилу поверхні  $\alpha$ ; також заданий тиск  $p$ , що діє на поверхню навантаження. Після формулювання визначальних співвідношень завдання доповнюється граничними і початковими умовами, що зазвичай вибирають з урахуванням геометрії контуру досліджуваного тіста, його структури й конкретних умов взаємодії з пластифікатором.

#### **Джерела та література**

1. Патент на корисну модель №21204. Тістомісильна машина / І. Я. Стадник, О.Т. Лісовенко (Україна); МКИ<sup>21</sup>A21C; Заявл. 20.11.06; Опубл. 15.03.07.
2. Петросян, Г.Л. Застосування методу кінцевих елементів до задач обробки тиском порошкових пористих тіл // Реологічні моделі та процеси деформування пористих порошкових і композиційних матеріалів [Текст] / Петросян Г.Л. - К.: Наукова думка. - 1985. - 159 с.
3. Медведєв, Г.М. Раціональна технологія переробки некондиційного хліба [Текст] / Медведєв Г.М., Фрейдін А.А., Білоусов Г.С. // Харчова промисловість. - 1996. - № 10. - С. 46.