

УДК 663.283

С.В. ЛЕНЗІОН, асп.  
Національний університет харчових технологій

## СИНТЕЗ ЗМІШУВАЧА РІДИННИХ ТА ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВАХ І АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ

---

Запропоновано форму та метод виготовлення змішувача рідин у потоці. Проведено чисельний розрахунок пружно-пластичного деформування заготовки труби для отримання форми поверхні елемента змішувача та чисельний розрахунок потоку рідини у запропонованому змішувачі з використанням методів обчислювальної гідродинаміки.

**Ключові слова:** змішування, гомогенізація, пульсація тиску, поперечне перемішування, метод скінченних елементів, обчислювальна гідродинаміка.

Предложены форма и метод изготовления смесителя жидкостей в потоке. Проведен численный расчет упруго-пластического деформирования заготовки-трубы для получения формы поверхности элемента смесителя и численный расчет потока жидкости в предложенном смесителе с использованием методов вычислительной гидродинамики.

**Ключевые слова:** смешивание, гомогенизация, пульсация давления, поперечное перемешивание, метод конечных элементов, вычислительная гидродинамика.

The shape and the fabrication method of fluid flow mixer are proposed. Numerical simulation of a raw pipe elasto-plastic deforming was performed in order to obtain the surface shape of element of the mixer as well as numerical simulation of the flow in proposed mixer with the use of Computational Fluid Dynamics.

**Key words:** mixing, homogenisation, pressure pulsations, transverse mixing, Finite Element Method, Computational Fluid Dynamics.

Важливим заходом інтенсифікації масообміну в газорідних системах визнано зміну тисків, що супроводжується деформаціями диспергованої газової фази, оновленням міжфазної поверхні, явищами коалесценції і повторного диспергування, тощо. Разом з тим газорідні середовища мають помітні дисипативні властивості, що вимагає особливих підходів в організації втручань в їх гідродинаміку.

Рідинні середовища з високими рівнями гомогенізації або рідинні середовища з додаванням твердої фази доцільно одержувати в поєднанні їх перетворень, наприклад, з операціями транспортування. Досягнення такого результату можливе за використання масообмінних ділянок трубопроводів зі змінними розмірами поперечних перерізів. Одним з варіантів таких рішень є випадок пос-лідовного чергування переходів від кругових до еліптичних перерізів [1].

Завданням даного дослідження є вирішення задачі синтезу такої масообмінної ділянки на основі моделювання пружно-пластичного деформування трубної конструкції з використанням

© С.В. Лензюн, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

методу скінченних елементів (МСЕ) та наступним визначенням гідродинамічних параметрів рідинних потоків в ній на основі використання методів обчислювальної гідродинаміки (ОГД).

З огляду на останнє, в рамках дослідження було розроблено комплексний підхід (алгоритм) чисельного моделювання даної задачі. Цей підхід стосується послідовності розрахунків, яка дозволяє замінити трудомісткий та витратний процес експериментального пошуку оптимальних параметрів елемента змішувача для досягнення максимального ефекту перемішування. Розроблений підхід складається з:

а) моделювання деформування заготовки-труби при навантаженні пуансоном за допомогою МСЕ з урахуванням фактичних фізичних властивостей матеріалу труби та з отриманням у результаті моделювання форми поверхні, що окреслює потік рідини;

б) моделювання потоку рідини методами ОГД з метою отримання гідродинамічних параметрів потоку, які є факторами, що визначають ступінь перемішування та гомогенізації;

в) аналіз отриманих гідродинамічних характеристик, і, за необхідності, корегування параметрів елемента змішувача та/або вхідних гідродинамічних параметрів потоку з повторним моделюванням з метою досягнення максимального ефекту перемішування.

Після знаходження оптимальних параметрів змішувача в результаті серії розрахунків завершальним етапом має стати виготовлення змішувача потоків в натурі для використання, наприклад, при змішуванні потоків виноматеріалів в процесах асамблювання, купажування та приготування тиражних сумішей для заводів вторинного бродіння.

Конструкція змішувача має бути виконана у формі труби зі змінним поперечним перерізом. Таку конструкцію пропонується отримати шляхом деформування труби з вибраним кроком із створенням залишкової деформації, яка однак не повинна приводити до зміни довжини внутрішнього периметра. В результаті деформування трубчаста конструкція перетворюється в масопровід з еліптичними перерізами з різними співвідношеннями довжин напівосей та площами. Найбільша площа відповідає круглому перерізу, а найменша — перерізу з мінімальним співвідношенням довжин напівосей  $b/a$ .

Базовим елементом для створення змішувача обрано трубу із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, з внутрішнім діаметром 49 мм та товщиною стінки 4,25мм.

Для досягнення необхідної конфігурації змішувача було розроблено пуансон спеціальної форми. Конфігурацію пуансона та схему навантаження труби пуансоном відображено на рис. 1.

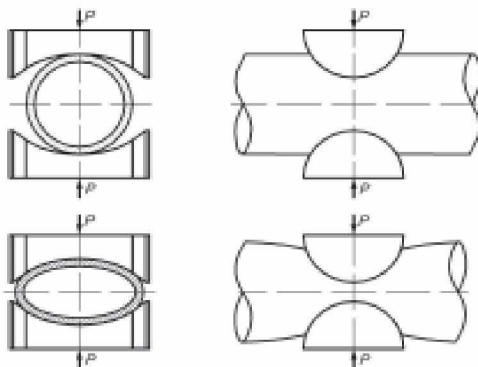


Рис. 1. Схема навантаження труби пуансоном

Чисельний розрахунок відбувався за умов моделювання вдавлювання абсолютно жорсткої поверхні пуансона в трубу в режимі жорсткого навантаження з використанням контактної алгоритму та з отриманням в результаті напружено-деформованого стану матеріалу труби.

Крок між пуансонами обрано рівним двом зовнішнім діаметрам труби (115 мм). В чисельному розрахунку моделювалось три зони деформації труби пуансонами.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Для отримання характеристик пружності та пластичності матеріалу (модуля пружності та істинної діаграми деформування) з метою закладення останніх у розрахунок МСЕ, було проведено експеримент на одновісний розтяг зразків, виготовлених із труби згідно вимог міжнародного стандарту ISO [2].

В результаті чисельного розрахунку було отримано форму потоку рідини, що обмежена внутрішньою стінкою деформованої труби і поля деформацій та напружень у вузлових точках моделі труби. На рис.2 відображено поле пластичної деформації, нанесене на деформовану модель труби.

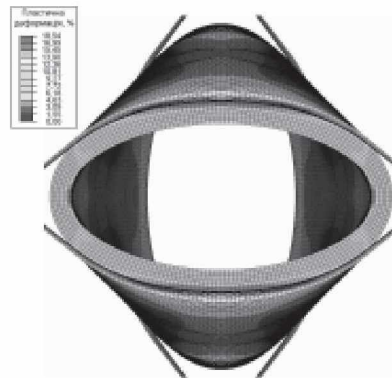


Рис. 2. Зображення результату розрахунку деформування труби

Влаштування змішувача на основі переходів від круглих перерізів до еліпсоподібних і знову до круглих означає зміну співвідношень довжин їх напівосей  $b/a$ , що визначає змінні значення площ поперечних перерізів. Звідси витікає, по-перше, що в умовах дії закону нерозривності потоку останній матиме змінні характеристики тисків і швидкостей; по-друге, звуження і розширення потоку із взаємоповернутими на кут  $90^\circ$  мінімальними еліптичними перерізами стимулює поперечне перемішування.

Схема положення перерізів з максимальними і мінімальними площами відображено на рис. 3.

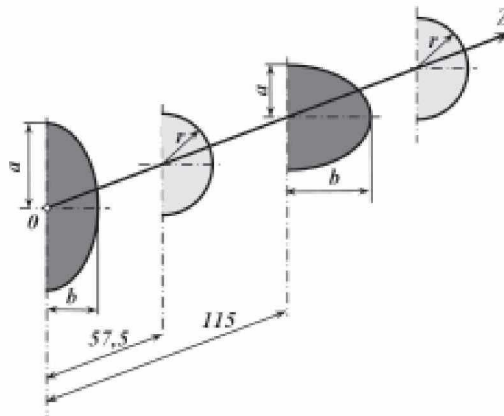


Рис. 3. Схема розташування перерізів з мінімальними і максимальними площами

Максимальна величина площі відповідає круглому поперечному перерізу і складає  $S_{кр} = 1885,7 \text{ мм}^2$ . Мінімальне значення площі еліптичних перерізів —  $0,76 S_{кр}$ .

Таким чином, трансформації потоку у формі швидкостей як у поздовжніх так і у поперечних напрямках означають виникнення масових сил (сил інерції), наслідком яких є

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

інтенсифікація масообмінних процесів. Подібні режими є особливо сприятливими для інтенсифікації масообміну в газорідних системах.

Використовуючи отриману форму області потоку рідини, в рамках наступного етапу даного дослідження проведено чисельний розрахунок гідродинамічних параметрів потоку нестискуваної рідини. Початкова форма області потоку та елементна сітка задачі відображені на рис. 4.

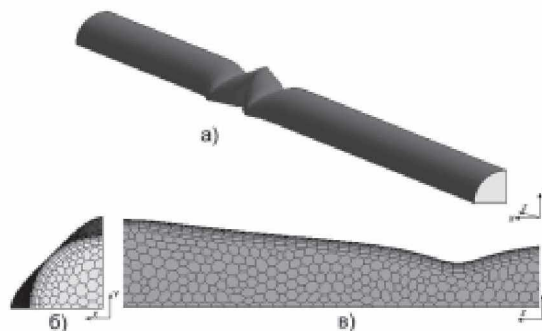


Рис. 4. Модель області потоку (а) та сітка розбивки на елементи (б, в) змішувача для розрахунку ОГД

З огляду на те, що потік вісесиметричний, модель області потоку обмежена однією четвертиною всієї області, з додаванням властивостей симетрії по двом площинам вздовж осі труби.

Вхідні параметри потоку обрано наступними: характерний розмір труби (внутрішній діаметр)  $d = 0,049$  м, або радіус  $R = 0,0245$  м, об'ємні витрати —  $10$  м<sup>3</sup>/год =  $0,002(7)$  м<sup>3</sup>/с. В якості рідини обрано вино. Фізичні характеристики вина наступні [3]: густина  $\rho = 980,7$  кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість  $\mu = 0,0018$  Па·с.

Число Рейнольдса для даного випадку  $Re = 39307$ , тому потік вважаємо турбулентним. Основні параметри потоку для розрахунку наведено у таблиці.

### Основні параметри потоку для розрахунків ОГД

Назва параметру	Позначення	Розмірність	Значення
Внутрішній діаметр труби	$d$	м	0,049
Площа поперечного перерізу	$A$	м <sup>2</sup>	0,001886
Об'ємні витрати потоку	$Q$	м <sup>3</sup> /с	0,002(7)
Середня швидкість потоку	$v_m$	м/с	1,473
Густина вина	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	980,7
В'язкість вина	$\mu$	Па·с	0,0018
Число Рейнольдса	$Re$	—	39307

На виході моделі потоку задавався тиск  $P = 1500$  Па, а на вході моделі — осьова швидкість потоку  $v(R)$  з профілем вздовж радіуса потоку, обчисленим за формулою[4]:

$$v(r) = v_m \left( 1 + 1,33\sqrt{f} - 2,04\sqrt{f} \cdot \log(R / (R - r)) \right), \quad (1)$$

де  $v_m$  — середнє значення швидкості;  $f$  — коефіцієнт тертя;  $R$  — радіус внутрішнього перерізу потоку;  $r$  — змінний радіус,  $r = [0 \div R]$ .

Коефіцієнт тертя  $f$  для випадку турбулентного потоку вираховувався чисельним методом (методом Ньютона) із рівняння Коулбрука-Уайта [4]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} + 0,269 \frac{k}{d} \right), \quad (2)$$

де  $\text{Re}$  — число Рейнольдса;  $k$  — абсолютна шорсткість поверхні трубопроводу (в даному дослідженні приймаємо  $k = 0$ );  $d$  — гідравлічний діаметр, що для потоку у трубі дорівнює її геометричному діаметру.

Для даного випадку,  $f = 0,0221$ .

Розрахунок за допомогою методу ОГД проведено у трьохвимірній постановці, в режимі стаціонарного потоку, з використанням рівнянь RANS,  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності та вбудованої в останню пристіночної суб-моделі.

На рис. 5 відображено поле осьової швидкості на площинах симетрії та на поперечних перерізах, отримане у результаті розрахунку. У мінімальних еліптичних перерізах має місце градієнт осьової швидкості по перерізу, в той час як у круглих перерізах розподілення швидкості близьке до розподілення, яке має місце при потоці у циліндричній трубі. Також слід відмітити присутність зон завихрення незначних розмірів із зворотнім потоком, що розташовані одразу за мінімальними перерізами.

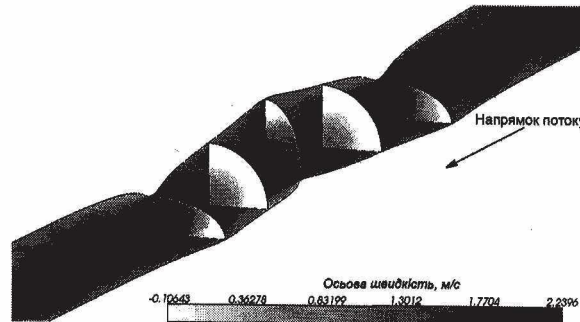


Рис. 5. Поле осьової швидкості на площинах симетрії та поперечних перерізах, отримане в результаті розрахунку

Для того, щоб оцінити ступінь поперечного перемішування, проаналізуємо отримані результати для компонент векторів швидкості. У ортогональній декартовій системі координат вектор швидкості можна представити сумою векторів:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z,$$

де  $\vec{v}_x$  — компонента вектора швидкості у напрямку осі  $x$  (поперечному горизонтальному),  $\vec{v}_y$  — у напрямку осі  $y$  (вертикальному),  $\vec{v}_z$  — у напрямку осі  $z$  (поздовжньому).

Перейдемо від абсолютних значень компонент вектора швидкості для кожної точки перерізу до деякої узагальненої характеристики перерізу. Чим більша величина цієї усередненої характеристики, тим, в цілому, швидший рух рідини в даному перерізі у даному напрямку, і навпаки. Графік зміни усереднених по перерізам абсолютних значень компонент швидкості  $\vec{v}_x$  та  $\vec{v}_y$  відображено на рис. 6.

Однак, найбільш повною характеристикою поперечного перемішування буде усереднене по перерізу абсолютне значення такої компоненти вектора швидкості, яка діє у площині перерізу і являє собою векторну суму поперечної горизонтальної та вертикальної компонент:  $\vec{v}_{xy} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$  (рис. 6). Поперечне перемішування найбільш активне у перерізах, які розташовані на відстані 9мм по обидва боки від мінімальних еліптичних перерізів.

В результаті розрахунку також отримано графік зміни усереднених по перерізу статичних тисків, який відображено на рис. 7.

Оскільки на частинку, що рухається з потоком рідини, діє лише статичний тиск, саме його аналіз становить інтерес з точки зору гомогенізації середовищ. Як бачимо із результатів розрахунку, за умов заданої геометрії потоку та швидкості, отримуємо пульсацію статичного тиску з амплітудою близько 750Па та частотою пульсацій — 13,68 Гц.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

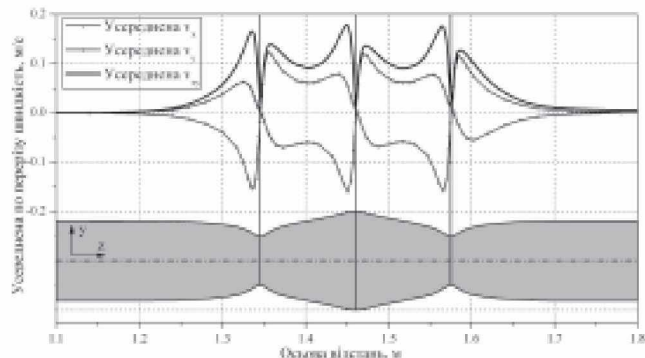


Рис. 6. Графік залежності усереднених по перерізу абсолютних значень компонент вектора швидкості

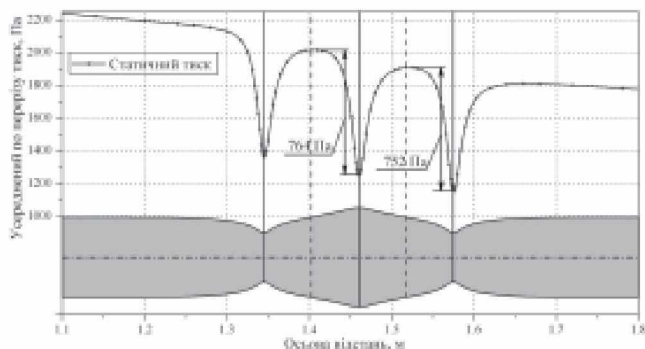


Рис. 7. Графік залежності усереднених по перерізу тисків на ділянці еліптичних перерізів

**Висновки.** Виконані дослідження дозволяють відмітити наступне.

1. Запропоновано форму та метод виготовлення змішувача рідин у потоці. Проведено моделювання пружно-пластичного деформування труби при навантаженні пуансоном обраної форми і отримано форму поверхні, що окреслює потік рідини в елементі змішувача.
2. Результати досліджень, які стосуються синтезу масообмінної ділянки змішувача потоків, підтверджують прикладну ефективність застосування чисельних методів до розв'язання задач апаратного забезпечення харчових виробництв.
3. На основі теорії ОГД і обраного алгоритму проведено розрахунок потоку рідини у запропонованому змішувачі, в результаті якого отримано якісні та кількісні характеристики гідродинамічних параметрів потоку у елементі змішувача, які визначають ступінь гомогенізації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Соколенко А.І., Піддубний В.А., Якимчук М.В., Лензіон С.В., Шевченко О.Ю. Інтенсифікація масообмінних процесів в системах транспортних потоків харчових виробництв. Научно-практический журнал „Хранение и переработка зерна”, №9(123), вересень 2009р., С. — 42—43.
2. ISO 6892-1:2009. *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.*
3. Мерджаниан А.А. Физико-химия игристых вин “ М.: Пищевая промышленность, 1979. “ 272с.
4. Kothandaraman C.P., Rudramoorthy R. *Fluid Mechanics and Machinery (Second Edition), New Age International Publishers, 2007.*

Одержана редколлегією 24.03.2011 р.