УДК 663.1/.4

SYNTHESIS OF ACTIVATED FLOW MIXERS

A. Sokolenko, I. Maksymenko, V. Kostyuk
National University of Food Technologies

Key words:
Flow mixer
Hydrodynamics
Mass transfer
Flow
Analysis
Synthesis

Article history:
Received 03.10.2019
Received in revised form 18.10.2019
Accepted 04.11.2019

Corresponding author:
A. Sokolenko
E-mail:
mif63@i.ua

ABSTRACT

The article deals with the features of the synthesis of activated flow mixers in combination with the solution of problems of their transportation.

An important area of activation is the creation of local systems with a high level of turbulence due to the kinetic energy of the flows and the creation of force influences in the form of alternating pressure. The latter is a consequence of the generation of variable kinematic parameters corresponding to the geometry of pipelines with variable cross-sectional areas. The basis of the chosen direction of synthesis of activated systems is based on the possibilities of computational Fluid Dynamics (CFD) on the balance of approaches of physics, hydrodynamics and mathematics with reference to the laws of conservation of mass, impulses of force influences and energy. Referring to the latter took the form of finite element methods (FEM) and finite volumes (FVM).

The concept of discretization of flow space and identical concept of discretization of space of deformed solid were adopted. The purpose of this work was to develop the theoretical basis for the synthesis of systems with activated mass transfer processes.

The design of the mixer is made in the form of a pipe with its transformation into a mass pipeline with elliptical sections with different ratios of lengths of axes. the display of the geometric parameters of the mixer was based on the numerical solution of the springy-plastic deformation of the pipe based on ITU, and the implementation was achieved using a rigid punch. The obtained geometry of the internal volume, made with the rotation of adjacent sections with a minimum area of 90°, allowed to go to the stage of determining the field of axial flow velocity on the planes of symmetry and in cross sections.

The graphical dependences of the averages of the cross sections of the absolute values of the velocity and pressure vector components with reference to the amplitude of static pressure pulsations near 750 Pa with a frequency of 13.68 Hz were presented.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-6-14

СИНТЕЗ АКТИВОВАНИХ ЗМІШУВАЧІВ ПОТОКІВ

А. І. Соколенко, І. Ф. Максименко, В. С. Костюк
Національний університет харчових технологій

У статті досліджено особливості синтезу активованих змішувачів потоків у поєднанні з вирішенням задач їх транспортування. Як важливий напрям активації запропоновано створення локальних систем з високим рівнем турбулентності за рахунок кінетичної енергії потоків і створення силових впливів у формі змінного тиску. Останній є наслідком генерування змінних кінематичних параметрів, що відповідають геометрії трубопроводів зі змінними площами поперечних перерізів. В основу обраного напряму синтезу активованих систем покладено можливості обчислювальної гідродинаміки (ОГД) на балансі підходів фізики, гідродинаміки й математики з дотриманням законів збереження маси, імпульсів силових впливів та енергії, що мало форму методів скінченних елементів (МСЕ) і скінченних об'ємів (МСО).

У дослідженні прийнято концепцію дискретизації простору потоку та ідентичну концепцію дискретизації простору деформованого твердого тіла. Визначено розвиток теоретичного підґрунтя синтезу систем з активованими масообмінними процесами.

Конструкцію змішувача виконано у формі труби з перетворенням її у масопровід з еліптичними перерізами з різними співвідношеннями довжин осей. Відображення геометричних параметрів змішувача ґрунтувалося на чисельному розв'язанні пружно-пластичного деформування труби на основі МСЕ, а реалізація досягалася шляхом використання жорсткого пуансона. Одержана геометрія внутрішнього об'єму, виконана з поворотом сусідніх перерізів з мінімальними площами на 90°, дала змогу перейти до етапу визначення поля осьової швидкості потоку на площинах симетрії та в поперечних перерізах.

Наведено графічні залежності усереднених по перерізу абсолютних значень компонент вектора швидкості й тиску з вказівкою на амплітуду пульсацій статичного тиску близько 750 Па з частотою 13,68 Гц.

Ключові слова: *змішувач потоків, гідродинаміка, масообмін, потік, аналіз, синтез.*

Постановка проблеми. Теоретичний розвиток гідроаеродинаміки ґрунтується, в основному, на побудові та розв'язанні рівнянь, придатних для різноманітних типів течії рідини або газу, а також на вивченні різного роду апроксимацій стосовно цих рівнянь [1].

Обчислювальна гідродинаміка своїм предметом має чисельне моделювання різноманітних течій рідин та газів [2], тісно пов'язана з теорією й експериментом і не зможе їх повністю замінити, а тому базується на належному балансі таких підходів, як фізика, гідродинаміка, математика [3; 4].

Загальноприйняте скорочення обчислювальної гідродинаміки — ОГД (англ. CFD — Computational Fluid Dynamics). Фізичні аспекти будь-якої течії рідини

визначаються трьома фундаментальними принципами: 1) законом збереження маси, 2) законом збереження імпульсу (другий закон Ньютона: сила = маса прискорення), і 3) законом збереження енергії. Ці фундаментальні фізичні принципи можуть бути виражені базовими математичними рівняннями, які, загалом, є інтегральними рівняннями, або рівняннями у часткових похідних [3]. Обчислювальна гідродинаміка — це технологія заміни інтегралів або часткових похідних у цих рівняннях на дискретизовані алгебраїчні форми, які, у свою чергу, розв'язуються за допомогою ЕОМ з отриманням у результаті числових значень параметрів поля потоку в дискретних точках простору та/або часу. Кінцевий результат ОГД — це набір числових значень, на відміну від аналітичних розв'язків у замкнутій формі. Однак метою майже будь-якого інженерного аналізу є кількісна оцінка задачі, тобто, власне, числа.

Для того, щоб замінити відповідні математичні формалізації на дискретизовані алгебраїчні форми, використовується чисельний метод дискретизації, зокрема, метод скінченних об'ємів (МСО).

МСО — це метод інтегрування систем диференційних рівнянь у часткових похідних [5]. Основна ідея цього методу полягає в тому, що для будь-якої величини φ, в кожній точці простору O (x, y, z, t), оточеному певним замкнутим скінченним об'ємом Ω, у момент часу t існує залежність: загальна кількість величини φ у зазначеному об'ємі може змінюватись лише за рахунок такиз факторів:

- транспорту кількості цієї величини через поверхню, що обмежує контрольний об'єм Ω, іншими словами — потік;
- генерації (джерела) або знищення (стоки) певної кількості величини φ всередині контрольного об'єму Ω.

З практичної точки зору, відмінність МСЕ та МСО полягає в тому, що кінцевим результатом розв'язування дискретизованих алгебраїчних рівнянь у МСЕ є набір числових значень шуканих величин у вузлах скінченних елементів (тобто в точках простору, що розглядається), тоді як аналогічний результат МСО являє собою набір числових значень шуканих величин у скінченних об'ємах простору, що розглядається (тобто маємо єдине числове значення для кожного елементарного об'єму).

Концепція дискретизації простору потоку ідентична концепції дискретизації простору деформованого твердого тіла при моделюванні задач теорії пружності та пластичності за допомогою МСЕ.

Важливим етапом розв'язування задач за допомогою ОГД є обрання відповідної моделі для опису течії рідини. Для отримання результату при чисельному моделюванні ламінарного потоку, по суті, достатньо розв'язання зазначених вище рівнянь Нав'є-Стокса, тоді як для отримання результату, що відповідає дійсності при турбулентному режимі потоку, цих рівнянь недостатньо.

Оскільки турбулентність характеризується випадковою поведінкою миттєвих значень швидкості, тиску, температури в певній точці рідини чи газу, це означає, що при одних і тих самих умовах детальна картина розподілення цих

величин у рідині щоразу буде різною і практично ніколи не повторюється. Тому миттєве розподілення швидкості у різних точках турбулентного потоку, зазвичай, не становить інтересу, а важливими є усереднені величини. Проблема описання гідродинамічної турбулентності полягає, зокрема, і в тому, що досі не вдається без експериментальних даних на підставі лише рівнянь гідродинаміки передбачувати, коли саме повинен починатися турбулентний режим і що саме в ньому має відбуватися. Тому для опису турбулентних потоків у рамках ОГД широко використовується так звана RANS-модель, яка базується на усереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса (англ. RANS — Reynolds-averaged Navier-Stokes).

Метод усереднення за Рейнольдсом [6] полягає в тому, що будь-яке миттєве значення гідродинамічних характеристик потоку (швидкість, тиск, густина) можна замінити сумами усереднених і пульсаційних складових. Фактично це означає, що гідродинамічна величина є випадковою, усереднення якої за часом дає її математичне очікування, а пульсаційна складова є дисперсією випадкової величини.

У [7; 8] позитивно оцінюється застосування усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) та k-ε моделі турбулентності при моделюванні потоку нестискуваних рідин у замкнутих контурах (трубах) зі змінним поперечним перерізом за допомогою методів ОГД.

Мета дослідження: розвиток теоретичного підґрунтя синтезу систем з активованими масообмінними процесами в рідинних і газорідинних потоках.

Матеріали і методи. В основу методики проведення досліджень покладено закони збереження з такими їх наслідками, як закон нерозривності потоку, рівняння Бернуллі і Навьє-Стокса, закони Архімеда, термодинамічної рівноваги, закономірності масообміну. Порівняльна оцінка досліджуваних процесів здійснювалася з використанням евристичних методів і феноменологічних узагальнень з урахуванням фізичних основ явищ.

Результати і обговорення. Важливим в інтенсифікації масообміну в газорідинних системах визнано зміну тисків, що супроводжується деформаціями диспергованої газової фази, оновленням міжфазної поверхні, явищами коалісценсії і повторного диспергування тощо. Разом з тим газорідинні 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, поєднуючи операцію їх перетворення з операцією транспортування. Досягнення цього можливе за використання масообмінних ділянок трубопроводів зі змінними розмірами поперечних перерізів. Одним із варіантів таких рішень є випадок послідовного чергування переходів від кругових до еліптичних перерізів.

У цьому дослідженні вирішується завдання синтезу такої масообмінної ділянки на основі деформації трубної конструкції з використанням методу скінченних елементів з подальшим визначенням гідродинамічних параметрів рідинних потоків в них на основі використання методів обчислювальної гідро-

динаміки. При цьому завершальним етапом має стати створення змішувача потоків виноматеріалів у процесах асамблювання, купажування та приготування тиражних сумішей у виробництві шампанських вин.

Конструкцію змішувача виконано у формі труби зі змінними поперечними перерізами. Останнє досягається за рахунок локальних деформацій з вибраним кроком, за рахунок чого трубчаста конструкція перетворюється в масопровід з еліптичними перерізами з різними співвідношеннями довжин осей. Очевидно, що кожному із співвідношень останніх відповідає певна площа поперечного перерізу, найбільша площа відповідає круглому перерізу, а найменша — мінімальному відношенню довжин осей b/a.

Виготовлення змішувача здійснювалося на основі труби з внутрішнім діаметром 49 мм за рахунок її залишкової деформації, яка однак не повинна приводити до зміни довжини внутрішнього периметра. Відображення геометричних параметрів змішувача ґрунтувалося на чисельному розв'язуванні пружно-пластичного деформування труби за допомогою МСЕ.

Для того, щоб отримати перерізи еліптичної форми при деформуванні труби, було розроблено та використано пуансон особливої форми. Конфігурація пуансона та схема навантаження ним труби відображена на рис. 1.

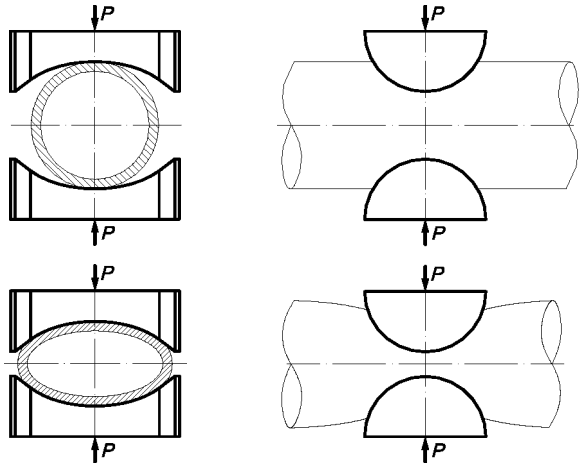

Рис. 1. Схема навантаження труби пуансоном

Чисельне моделювання елемента змішувача за допомогою МСЕ відбувалось за умов максимального наближення до фізичного процесу деформування, тобто модель включала в себе абсолютно жорстку поверхню пуансона, який вдавлювався у трубу в режимі жорсткого навантаження. При цьому використовувався один із контактних алгоритмів — алгоритм на основі методу множників Лагранжа. Тож завдання на переміщення жорсткого пуансона супроводжувалось розрахунком відгуку труби із пружно-пластичного матеріалу з визначенням її напружено-деформованого стану.

Крок між прижимами дорівнював двом зовнішнім діаметрам труби (115 мм). У чисельному розрахунку моделювалось три зони деформації труби, але завдяки симетрії фактично задавалась 1/8 частина загальної моделі.

Для того, щоб отримати фізичні характеристики матеріалу, був проведений експеримент на одновісний розтяг зразків, виготовлених із труби. В результаті експерименту отримано характеристики пружності та пластичності матеріалу, а саме: модуль пружності та істинну діаграму деформування в координатах деформація-напруження. Ці експериментальні дані було закладено у чисельний розрахунок.

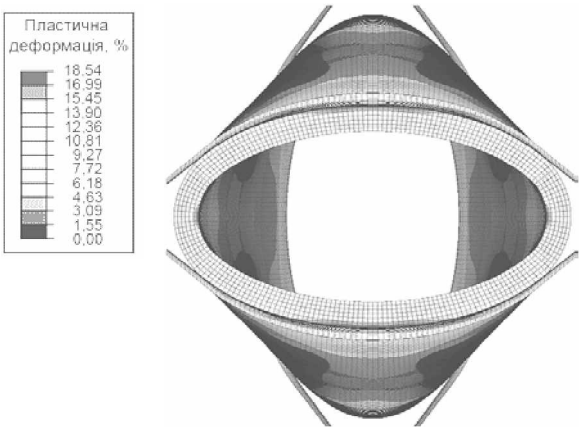

Рис. 2. Зображення деформованої труби відповідно до розрахунку

На рис. 2 відображено результат чисельного моделювання процесу деформування основного елемента змішувача на основі методу скінченних елементів.

У результаті навантаження труби пуансонами максимальне значення пластичної деформації досягається на внутрішній поверхні в області квадрантів більшої півосі еліпсу і досягає 18,5%. Таким чином, у результаті чисельного розрахунку отримано форму потоку рідини, обмежену внутрішньою поверхнею деформованої труби.

Розрахунками визначалися розміри *а* і *в* напівосей еліпсу плинного перерізу залежно від координати відліку відстані від перерізу з мінімальною площею, співвідношення $k = a/b$, площі перерізів, площі критичного перерізу $S_{кр}$, що відповідає круглому перерізу і становить 1885,7408 мм^2.

З них видно, що влаштування змішувача на основі переходів від круглих перерізів до еліпсоподібних і знову до круглих означає зміну співвідношень довжин їх півосей b/a, що визначає змінні значення площ поперечних перерізів. Звідси випливає, по-перше, що в умовах дії закону нерозривності потоку останній матиме змінні характеристики тисків і швидкостей. По-друге, звуження і розширення потоку означає наявність у ньому поперечних токів або поперечного перемішування. Положення перерізів з максимальними і мінімальними площами відображуються на схемі (рис. 3), а зміни довжин півосей еліпсів перерізів наведені на рис. 4.

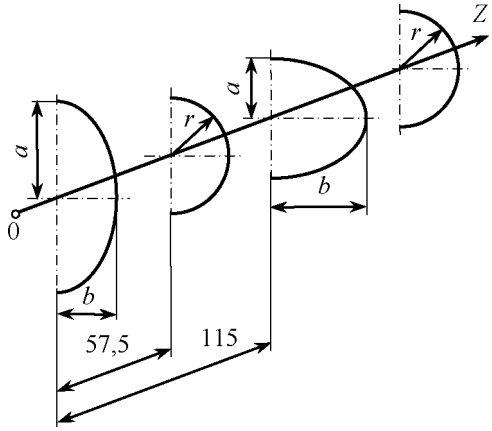

Рис. 3. Схема розташування перерізів з мінімальними і максимальними площами

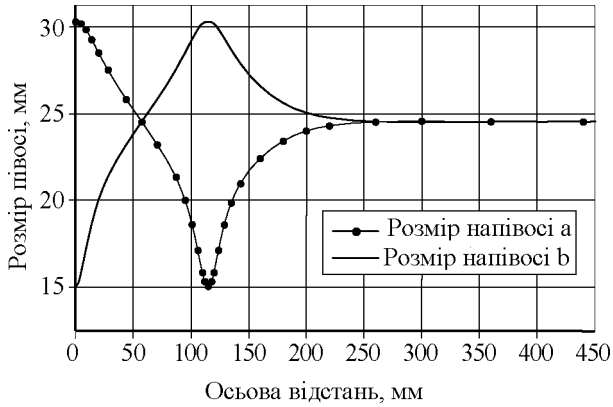

Рис. 4. Графік зміни довжин півосей еліпсів перерізів змішувача

Наявність максимумів і мінімумів значень півосей a, b та r вказує на те, що перерізи з найменшими площами, які у своєму положенні відповідають вказаним екстремумам, взаємно повернуті на кут 90°. Останнє також є стимулятором поперечного перемішування потоку.

На рис. 5 наведено графік співвідношення $k = b/a = b/a(z)$. Очевидно, що значенням $k = 1$ у положеннях по осі Z відповідають кругові перерізи змішувача.

З точки зору впливу на гідродинаміку потоку значення має площа поперечного перерізу, максимальна величина якої відповідає круглому перерізу і складає $S_{кр} = 1885{,}7408$ *мм*^{2}. Співвідношення плинного значення S до критичного наведено на рис. 6.

Нелінійний характер вказаної функції означає подібну нелінійну залежність, яка характеризує зміни тиску і середньої швидкості потоку. Очевидно, що при цьому також цілком визначеною є частота впливів.

Отже, трансформації потоку у формі швидкостей як у поздовжніх, так і у поперечних напрямках означають виникнення масових сил (сил інерції), наслідком яких є інтенсифікація масообмінних процесів. Подібні режими є особливо сприятливими для інтенсифікації масообміну в газорідинних системах.

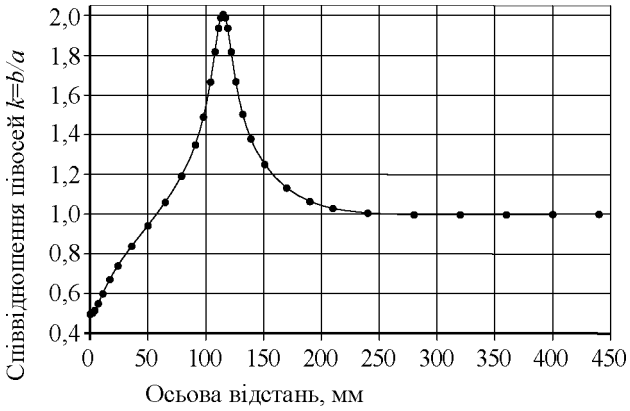

Рис. 5. Графік співвідношення півосей еліпсів перерізів змішувача

Результати досліджень, які стосуються синтезу масообмінної ділянки змішувача потоків, показують прикладну ефективність застосування чисельних методів і доцільність подальшого їх використання в моделюванні гідродинаміки робочих процесів.

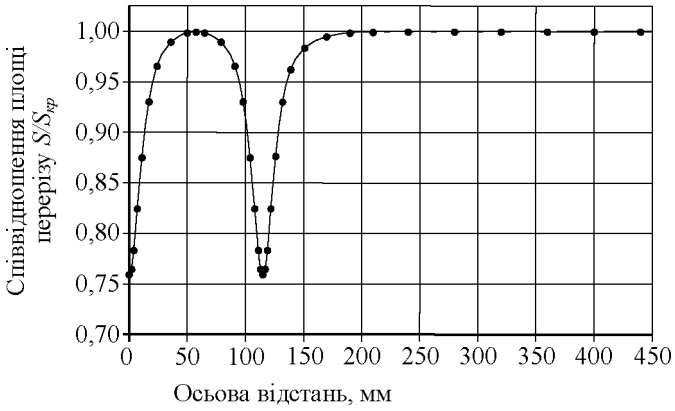

Рис. 6.
Співвідношення плинного значення площі перерізу до критичного

На першому етапі за допомогою чисельного моделювання деформування труби методом скінченних елементів отримано форму області потоку рідини у змішувачі з трьома прижимами, яка була використана для розрахунку потоку рідини в рамках обчислювальної гідродинаміки. Початкова форма області потоку та елементна сітка задачі стосуються змішувача з кількістю елементарних об'ємів (елементів) для задачі — 74425.

Аналогічно тестовим розрахункам, завдяки симетрії області потоку в цьому випадку, також будемо розглядати одну четверту частину цієї області.

Для отримання усталеного режиму потоку до і після елемента змішувача до обраної геометрії додаємо додатково циліндричні частини довжиною 1 м на вході та 0,5 м на виході.

Початкові дані для розрахунку: сумарна довжина змішувача — 2,42 м; об'ємні витрати рідини — 10 м^3/год = 0,002(7) м^3/с; густина вина ρ = 980,7 кг/м^3; динамічна в'язкість вина μ = 0,0018 Па·с. Задавався профіль осьової швидкості $v(r)$, обчислений за формулою [9]:

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

на вході та тиск P = 1500 Па на виході.

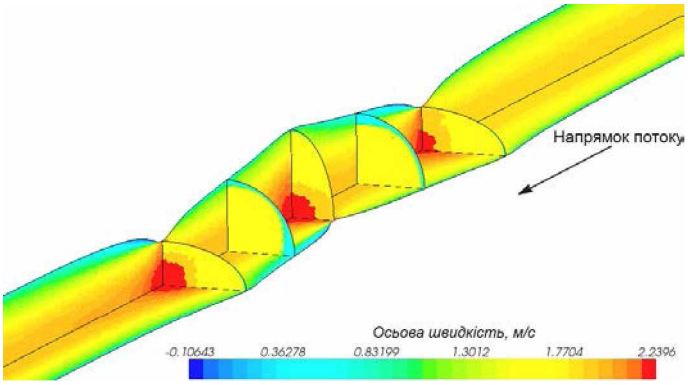

Рис. 7. Поле осьової швидкості на площинах симетрії та поперечних перерізах, отримане в результаті розрахунку

На рис. 7 відображено поле осьової швидкості на площинах симетрії та на поперечних перерізах, отримане у результаті розрахунку. Як бачимо, 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 наявність зон завихрення незначних розмірів із зворотним потоком, що розташовані біля стінки одразу за мінімальними перерізами. Локальна максимальна швидкість зворотного потоку складає 5% від максимального значення швидкості у найменшому еліптичному перерізі.

Для того, щоб оцінити ступінь поперечного перемішування, проаналізуємо отримані результати для компонент векторів швидкості. В 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 узагальненої характеристики перерізу. Слід відмітити, що в розрахунок (завдяки симетрії) закладено одну четверту частину геометрії потоку, тому всі отримані результати по перерізах будуть відповідати результатам одного квадранта перерізу потоку. В результаті розрахунку ми можемо отримати поле будь-якої компоненти вектора швидкості у будь-якому перерізі у вигляді графічного зображення з градієнтом кольору. Наприклад, для оцінки вертикальної (або поперечної горизонтальної) компоненти швидкості суму абсолютних значень цієї компоненти для кожного пікселя зображення перерізу розділимо на кількість пікселів, отримавши усереднене по площі перерізу абсолютне значення вертикальної (або горизонтальної) компоненти швидкості. Тож чим більша величина цієї усередненої характеристики, тим, у цілому, швидшим є рух рідини у цьому перерізі у певному (вертикальному або поперечному горизонтальному) напрямку, і навпаки. Знак «мінус» означає, що рідина у перерізі рухається у напрямку, протилежному напрямку осі. Графік зміни усереднених по перерізах абсолютних значень компонент швидкості $\vec{v}_x$ та $\vec{v}_y$ відображено на рис. 8.

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: $\vec{v}_{xy} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$. Графік зміни усереднених по перерізах абсолютних значень компоненти $\vec{v}_{xy}$ відображено на рис. 8 суцільною лінією. Як видно з рис. 8 поперечне перемішування найбільш активне у перерізах, які розташовані на відстані 9 мм по обидва боки від мінімальних еліптичних перерізів.

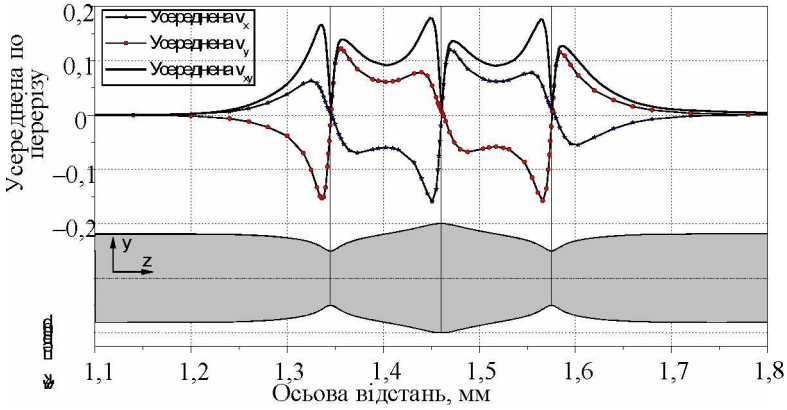

Рис. 8. Графік залежності усереднених по перерізу абсолютних значень компонент вектора швидкості

Аналогічно до тестових задач, в результаті цього розрахунку отримуємо графіки зміни статичного тиску та сумарного тиску, усереднених по перерізу, які представлені на рис. 9.

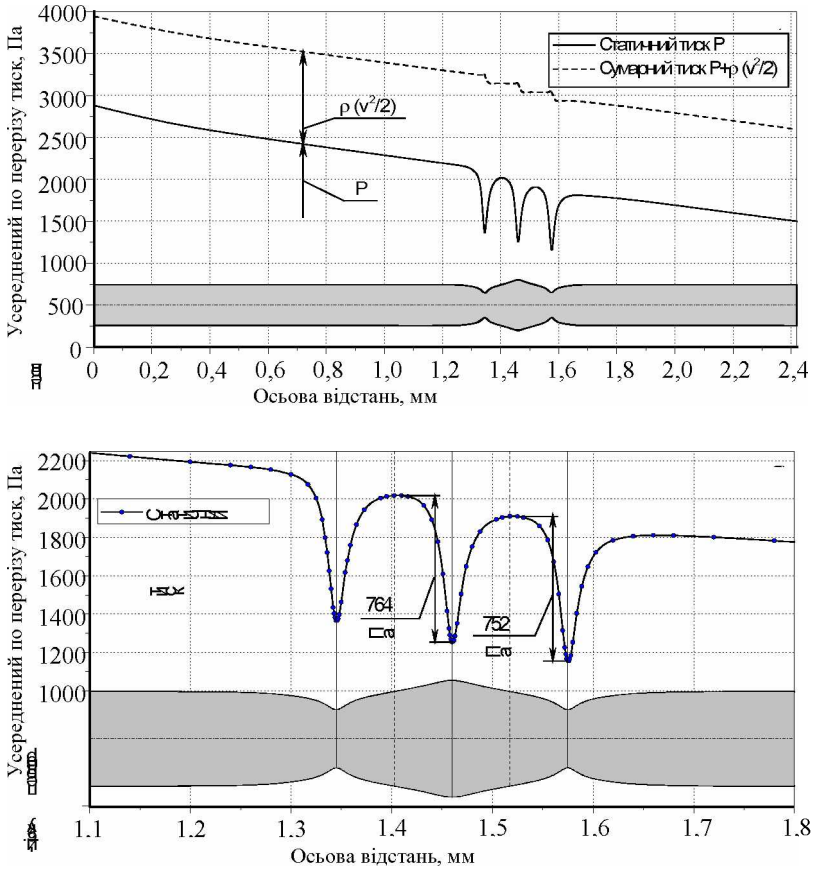

Рис. 9. Графік залежності усереднених по перерізу тисків:
а) по всій довжині розрахункової моделі; б) на ділянці еліптичних перерізів

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 750 Па.

Знаючи осьову компоненту швидкості $\vec{v}_z$ у кожному з перерізів, можемо знайти час, за який потік проходить шлях від одного мінімального еліптичного перерізу до наступного. Цей час становить 0,073 с, тож значення для частоти пульсацій тиску — 13,68 Гц.

Висновки

Вирішення задачі синтезу активованого змішувача рідинних потоків у формі деформованої ділянки трубопроводу виконано у два етапи. Першому етапу

відповідає моделювання деформації труби-заготовки навантаженням пуансоном спеціальної форми з використанням методу скінченних елементів і одержанням поверхні, що окреслює потік рідини.

Показано, що моделювання рідинного потоку методами обчислювальної гідродинаміки забезпечує можливість отримання параметрів, які є факторами оцінювання ступеня перемішування і гомогенізації. Розроблена математична модель дає змогу введенням інших початкових параметрів вирішувати задачі пошуків екстремальних результатів.

На другому етапі виконано розрахунки щодо тестової задачі зі створення масообмінної ділянки для змішування вина з лікером у потоці, які свідчать про їхню адекватність.

Література

1. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х томах: Т. 1: Пер. англ. Москва: Мир, 1991. 504 с.

2. Роуч П. Вычислительная Гидродинамика. Москва: Мир, 1980. 618 с.

3. Anderson John D., Jr. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, 1995.*

4. Chung T. J. *Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 2002.*

5. Harvard Lomax, Thomas H. Pulliam, David W. Zingg. Fundamentals of Computional Fluid *Dynamics, 1999.*

6. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СП.-П.: Балтийский государственный технический университет, 2001. 108 с.

7. Ганиев Р. И. Анализ течения в трубопроводе со стандартной диафрагмой средствами вычислительной гидродинамики: дисс. … канд. техн. наук: 01.02.05. Казань: Казанский государственный технологический университет, 2009. 212 с.

8. Bajura R. A., Pellgrin M. T. Studies of pulsating incompressible flow through orifice meter.*U. S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ.* 1977. № 84/2. P. 523—548 (502 — conclusions).

9. Kothandaraman C. P., Rudramoorthy R. Fluid Mechanics and Machinery (Second Edition), New Age International Publishers, 2007.