

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У КАВІТАЦІЙНОМУ МОДУЛІ СТАТИЧНОГО ТИПУ

RESEARCH OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN CAVITATION STATIC TYPE MODULE

Наведено результати моделювання кавітаційних течій у гідродинамічному модулі із застосуванням програмного пакету SolidWorks. В основі розрахунків використано рівняння Нав'є-Стокса, яке доповнено рівняннями стану рідини та емпіричними залежностями, що характеризують параметри рідини. Результати, які отримано, добре узгоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: гідродинамічний модуль, кавітаційні течії, моделювання, рівняння стану рідини.

Вступ

Незважаючи на значний досвід застосування кавітаційної техніки у промисловості зацікавленість науковців до гідродинамічних пристроїв статичного типу, ефективність яких забезпечують потужні фізико-хімічні ефекти, що виникають внаслідок просторового зниження тиску й зміни геометрії течії на робочій ділянці, не зменшується. Позитивним є те, що енергія для забезпечення кавітації в таких пристроях підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини, а ефективністю та інтенсивністю впливу на технологічне середовище можна керувати змінюючи технічні та технологічні параметри системи. Попередні дослідження [1] свідчать, що збільшення введення енергії до системи не завжди є доцільним, оскільки різні процеси вимагають індивідуального підходу.

Наприклад, якщо для гомогенізації чи знезаражування доцільними є жорсткі режими кавітації, то для розчинення чи екстрагування добрі результати отримано за бульбашкового режиму. Тому вибір конструкції кавітаційного модуля зазвичай здійснюють індивідуально для кожного процесу. Водночас для нових моделей не завжди є доцільним проводити натурні випробування, оскільки вони є трудомісткими. У таких випадках виконують теоретичний аналіз роботи системи, використовуючи моделювання.

Метою цієї роботи було проведення досліджень гідродинамічних характеристик робочого модуля, що можуть створювати передумови для його використання на практиці та порівняння отриманих даних з експериментальними на предмет можливого застосування програмного пакету.

Основні результати досліджень

Конструкцію кавітаційної ділянки експериментального стенда показано на рисунку 1.

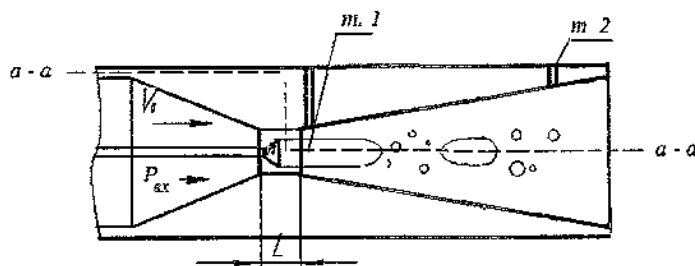


Рисунок 1 — Схема модельної ділянки

Кавітаційні явища у таких пристроях виникають у потоці рідини через зменшення тиску на ділянці стиснення до значень насичених парів рідини. Характер явищ залежить від швидкості потоку та його газонасичення. Параметр, який підтверджує кавітаційний режим, є число кавітації, яке розраховують за рівнянням [2]

$$\sigma = 2 \cdot (p_{\kappa} - p_k) / (\rho \cdot v^2).$$

Ступінь впливу на середовище оцінюють за стадією кавітації λ [2].

Розрахунок розподілу тисків, швидкостей і інших параметрів вздовж робочої ділянки здійснювали за допомогою прикладного програмного пакету SolidWorks і зокрема його модуля для моделювання течії рідин і газів Flow Simulation. Програмний модуль моделює рух потоку на основі рішення рівняння Нав'є-Стокса, яке є інтерпретацією законів збереження маси, імпульсу і енергії для потоку рідини (потоків рідин і газів).

Рівняння доповнено виразами стану рідини, які визначають природу рідини, та емпіричними залежностями густини, в'язкості і теплопровідності рідини від температури. Нестискувані неньютонівські рідини розглядаються за залежностями їхньої динамічної в'язкості від швидкості деформації зсуву і температури, а стискувані рідини — за зміною їхньої густини від тиску. Інша части-

на рівнянь відповідає за геометрію потоку, граничні та початкові умови.

Закони збереження маси, імпульсу і енергії для потоку рідини в декартовій системі координат, яка обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через початок системи координат, можна записати наступним чином:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \cdot u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_i \cdot u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} \cdot \tau_{ij}^R) + S_i,$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) +$$

$$+ \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H.$$

Для виконання аналізу за допомогою *Flow Simulation* було створено твердотільну модель кавітаційного модуля (рисунок 2) в *Solid Works*, задано граничні умови моделювання та проведено розрахунок щодо зміни тиску, швидкості й завихреності у межах робочої ділянки. Окремі результати показано на рисунках 3–5.

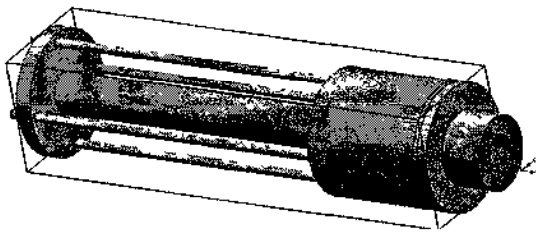


Рисунок 2 — Твердотільна модель кавітаційного модуля гідродинамічного типу

Отримані результати (рисунки 3, 4) добре підтверджують існуючі теоретичні закономірності гідродинамічних основ щодо перебігу кавітаційних явищ. Спостерігається падіння тиску до “порогу” кавітації та поступове його відновлення на границі ділянки розриву суцільності. Загалом розглядали варіанти конструкції за різних кутів розкриття конуса в границях 40°–80°.

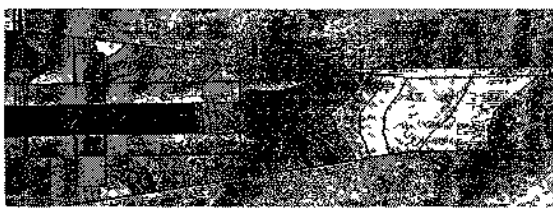


Рисунок 3 — Розподіл завихреності у потоці рідини вздовж робочої ділянки кавітаційного модуля

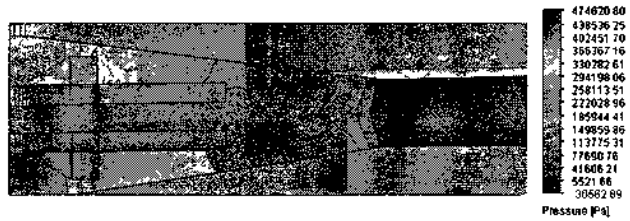


Рисунок 4 — Розподіл тиску в потоці рідини вздовж робочої ділянки кавітаційного модуля



Рисунок 5 — Розподіл швидкості потоку рідини вздовж робочої ділянки кавітаційного модуля

Найбільші завихрення потоку та зрив вихорів спостерігається за перешкодою. Причому найбільший вплив на цей процес має гострота кромки конуса, а тонкі шари рідини, в яких присутні завихрення, є нестійкими і поступово згасають.

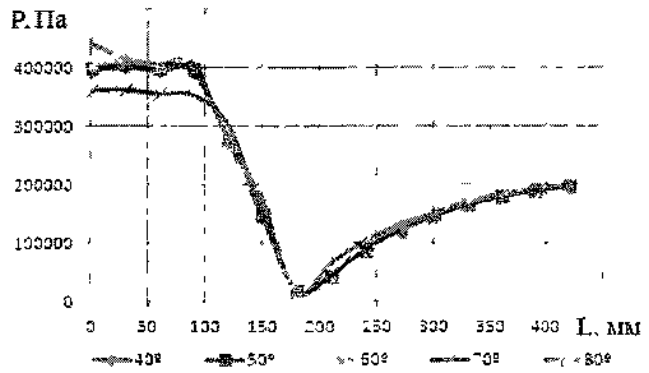


Рисунок 6 — Розподіл тиску вздовж робочої ділянки за різних значень розкриття конуса

На рисунку 6 зображено зміни тиску поздовж робочої ділянки при різних кутах розкриття конуса.

За цими даними було визначено довжину ділянки кавітації та проведено порівняння розрахунку з візуальними дослідженнями (таблиця 1, рисунок 7). Зйомку проводили відеокамерою з різним терміном експозиції кадрів, мінімальний час становив 1/8000 с.

Таблиця 1 — Порівняння експериментальних ($L_{експ}$) і розрахункових ($L_{роз}$) значень довжини ділянки кавітації

$\alpha, ^\circ$	40		50		60		70		80	
$L, мм$	$L_{роз}$	$L_{експ}$	$L_{роз}$	$L_{експ}$	$L_{роз}$	$L_{експ}$	$L_{роз}$	$L_{експ}$	$L_{роз}$	$L_{експ}$
	70	69	90	91	92	93	90	92	74	75

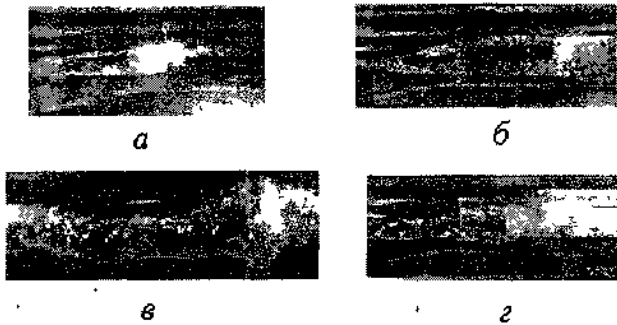


Рисунок 7 — Фото досліджуваної ділянки: а — $\alpha = 40^\circ$, б — $\alpha = 50^\circ$, в — $\alpha = 60^\circ-70^\circ$, г — $\alpha = 80^\circ$

Фотографії, що показано на рисунку 7, свідчать про нестабільність геометрії кавітаційної ділянки, зокрема, її хвостової частини. Така закономірність можлива за умови виділення газової фази у межах робочої ділянки, що викликає зміни тиску в порожнині та призводить до пульсацій хвостової частини каверни. Експериментально зміну тиску за кавітуючим елементом (точка 1) і відновленої течії (точка 2) визначали у діапазоні зміни

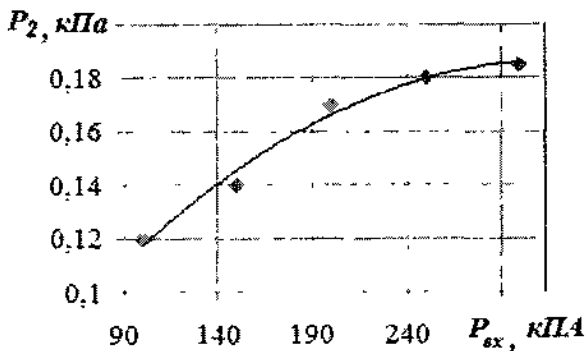
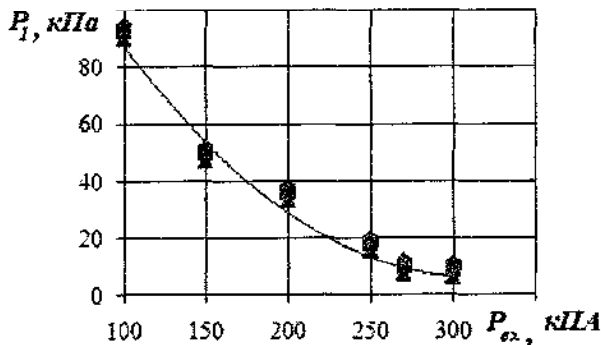


Рисунок 8 — Залежність зміни величини абсолютного тиску від тиску на вході при $\alpha = 60^\circ$: а — у точці 1; б — у точці 2

стадії кавітації ($\lambda = \frac{l_k}{d_k}$ — відношення довжини каверни до діаметра перешкоди [3]) від 1 до 5 за відповідних значень критеріїв $Re_{кав}$. Цей критерій також характеризує і визначає вид кавітації. Наприклад, за умови $\lambda = 1$, формується бульбашкова кавітація, якщо $1,5 < \lambda < 2,8$ — розвинена, а при $\lambda = 5$ і більше — змішана. Зміну забезпечували за допомогою засувки.

На рисунку 8, а показано експериментальну графічну залежність зміни величини абсолютного тиску в точці 1 та зміну відновленого тиску (рисунку 8, б) від тиску на вході за значення $\lambda = 2,5$, побудовану за експериментальними даними. Спостерігається зниження тиску в точці 1 за умови зростання вхідного надлишкового тиску, та його зростання у точці 2.

Аналогічні результати отримаємо для інших кутів розкриття конуса.

Результати розрахунку щодо зміни швидкості течії у межах робочої ділянки зображено на рисунку 9.

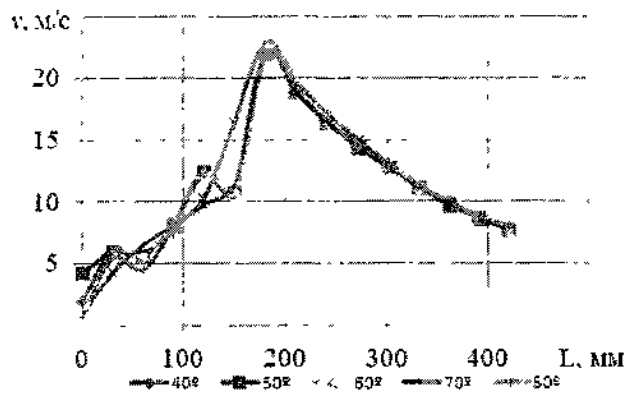


Рисунок 9 — Зміна швидкості вздовж лінії а-а

Ці результати не суперечать теоретичним уявленням щодо поведінки рідин під час руху у пристроях аналогічних конструкцій, для яких характерно те, що швидкість потоку під час проходження ділянки звуження зростає, а статичний тиск падає. Це явище пояснюється переходом частини потенційної енергії потоку в кінетичну та рівнянням суцільності потоку. Після подолання звуження потік знову розширюється, середня швидкість потоку зменшується, а статичний тиск зростає. Розрахункові дані вказують також на те, що тиск у перерізі на виході з моделі менший за тиск у перерізі на вході, що можна пояснити втратами тиску через подолання сил тертя у місці звуження потоку.

Висновки

Таким чином, пакет *Flow Simulation* можна використовувати для вирішення внутрішніх гідродинамічних задач харчової технології. Це дасть змогу суттєво скоротити витрати часу на етапах вивчення, проектування, впровадження та експлуатації нових і існуючих технологічних процесів і обладнання.

Література

1. Вітенько, Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: Наукова монографія / Т.М. Вітенько. — Тернопіль: ТДТУ, 2009. — 224 с.

2. Кнепп, Р. Кавітація / Пер. с англ.; Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хеммит. — М.: Мир, 1974. — 687 с.

3. Литвиненко, О.А. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості / О.А. Литвиненко., О.І. Некоз [та ін.]. — К.:РВЦ УДХТ, 1999. — 87 с.

References

1. Vitenko, T.M. *Gidrodynamichna kavitatsia u masoobminnykh, khimichnykh i biologichnykh protsesakh: Naukova monografia* / T.M. Vitenko. — Ternopil: TDTU, 2009. — 224 S.

2. Knepp, R. *Kavitatsia: per. s angl.* / R. Knepp, Dzh. Deili, F. Khemmit. — M.: Mir, 1974. — 687 s.

3. Litvinenko, O.A. *Kavitatsiyni prystroi v kharchoviy, pererobniy ta farmatsevtichniy promislovosti* / O.A. Litvinenko, O.I. Nekoz [ta in.]. — K.: RVTS UDKHT, 1999. — 87 s.

Надійшла 5.03.2014 року

УДК 532.528

Исследование гидродинамических параметров в кавитационном модуле статического типа

Т.В. Зарецкая, Н.И. Городиский,
Т.М. Витенько

Приведены результаты моделирования кавитационных течений в гидродинамическом модуле с использованием программного пакета *SolidWorks*. В основе расчетов использовано уравнение Навье–Стокса, дополненное уравнениями состояния жидкости и эмпирическими зависимостями, характеризующими параметры жидкости. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова. гидродинамический модуль, кавитационные течения, моделирование, уравнения состояния жидкости.

UDC 532.528

Research of the hydrodynamic parameters in cavitation static type module

Т.М. Zaretskaia, N.I. Gorodiskiy,
T.M. Vitenko

The results of the simulation of cavitation flows in the hydrodynamic module by using *SolidWorks* software package are represented in work. Navier–Stokes equation which is supplemented by the equations of state of liquid and empirical dependencies which are characterizing of parameters of the fluid is used for calculation. The results are in good agreement with experimental data.

Key words hydrodynamic module, cavitation flows, simulation, equations of state of liquid.