



2022

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 28 № 2

*Журнал
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
видається з 1938 року*

КИЇВ ✧ НУХТ ✧ 2022

Articles with the results of fundamental theoretical developments and applied research in the field of technical and economic sciences are published in this journal. The scripts of articles are reviewed beforehand by leading specialists of corresponding branch.

The journal was designed for professors, tutors, scientists, post-graduates, students of higher education establishments and executives of the food industry.

Journal “Scientific Works of National University of Food Technologies” is included into the list of professional editions of Ukraine of technical (specialties — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) and economic sciences (specialties — 051, 073, 075), category “B” (Decree of MES of Ukraine # 975 from July 11, 2019), where the results of dissertations for scientific degrees of PhD and candidate of science can be published.

The Journal “Scientific Works of National University of Food Technologies” is indexed by the following scientometric databases:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

The Journal is recommended for publication of research results by the Ministry of Science and Higher Education of Poland.

Editorial office address:

National University of
Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building B, room 412
01601 Kyiv, Ukraine

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies. Minutes of meeting # 9 from 28th of April, 2022

© NUFT, 2022

У журналі публікуються статті за результатами фундаментальних теоретичних розробок і прикладних досліджень у галузі технічних та економічних наук. Рукописи статей попередньо рецензуються провідними спеціалістами відповідної галузі.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, докторантів і студентів вищих навчальних закладів, керівників підприємств харчової промисловості.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних (спеціальності — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) та економічних наук (спеціальності — 051, 073, 075), категорія «Б» (Наказ МОН України № 975 від 11.07.2019), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» індексується такими наукометричними базами:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

Журнал рекомендовано Міністерством науки і вищої освіти Польщі для публікації результатів наукових досліджень.

Адреса редакції:

Національний університет
харчових технологій
вул. Володимирська, 68,
корпус Б, к. 412,
м. Київ, 01601

Рекомендовано вченою радою Національного університету харчових технологій.
Протокол № 9 від 28 квітня 2022 року

© НУХТ, 2022

ЗМІСТ

Безпека харчових продуктів і охорона праці

Романовська Т. І., Осейко М. І., Романовська Н. І., Романовський Н. О. Основні вимоги до систем управління безпечністю промислового харчового виробництва

Біотехнології

Пирог Т. П., Ключка І. В., Ключка Л. В. Вплив інактивованих клітин конкурентних мікроорганізмів на біологічну активність поверхнево-активних речовин *Rhodococcus erythropolis* IMB Ac-5017

Економіка, менеджмент і маркетинг

Кундєєва Г. О., Скопенко Н. С. Стійкість розвитку: продовольча безпека та безпека харчування як результат стійкості продовольчої системи

Шеремет О. О., Гринюк Ю. М. Типові характеристики HR-проектів та їх пілотних версій

Механічна та електрична інженерія

Балута С. М., Копилова Л. О., Куєвда Ю. В., Чорний Ю. А., Куєвда В. П., Зінкевич П. О. Системи електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів з використанням відновлювальних джерел енергії та накопичувачів

Філоненко В. М. Діаметр паропроводу: теплоенергетичний аспект

Слюсенко А. М., Пономаренко В. В., Блаженко С. І., Хитрий Я. С. Дослідження процесу розпилення рідини за допомогою CFD-технологій

Харчові технології

Дорохович В. В., Михальська Л. В. Визначення впливу насіння чіа на якісні показники здобного печива на цукрі і фруктозі

Сімахіна Г. О., Науменко Н. В., Межубовський О. М. Культивовані гриби — джерело нутрієнтів для виробництва харчових продуктів та дієтичних добавок

Рубанка К. В., Шевченко О. Ю. Застосування картопляної мезги у технології снєків

Башта А. О., Івчук Н. П., Бажай-Жежерун С. А. Дослідження технології халви оздоровчого призначення

Адамчук Л. О., Постойенко Г. В., Баль-Прилико Л. В., Двикалюк Р. М., Антонів А. Д., Пилипко К. В. Дослідження меду натурального на вміст залишків антибіотиків

Гойко І. Ю., Стеценко Н. О. Дослідження впливу фітокомпозиції антиоксидантної дії на комплексну оцінку якості йогурту

CONTENTS

Food Products Safety and Occupational Health

7 Romanovska T., Oseiko M., Romanovska N., Romanovskiy N. Basic requirements for safety management systems of industrial food production

Biotechnologies

24 Pirog T., Kliuchka I., Kliuchka L. Influence of inactivated cells of competitive microorganisms on the biological activity of *Rhodococcus erythropolis* IMV Ac-5017 surfactants

Economy, Management and Marketing

36 Kundieieva H., Skopenko N. Sustainability of development: food security and nutrition security as a result of sustainability of the food system

54 Sheremet O., Hryniuk Y. Typical characteristics of HR-projects and their pilot versions

Mechanical and Electrical Engineering

63 Baluta S., Kopilova L., Kuievda Iu., Chornyi Y., Kuevda V., Zinkevych P. Electrical supply systems for industrial and civil facilities using renewable energy sources and accumulators

74 Filonenko V. Steam pipe diameter: heat energy aspect

90 Sliusenko A., Ponomarenko V., Blazhenko S., Khitriy Ya. Investigation of the process of spraying liquid using CFD-technologies

Food Technologies

108 Dorohovych V., Mykhalska L. Research of the influence of chia seeds on the quality indicators of buttery cookies with sugar and fructose

118 Simakhina G., Naumenko N., Mezhubovsky O. Cultivated mushrooms as a source for production of foodstuffs and dietetic additives

132 Rubanka K., Shevchenko O. Application of potato pulp in technology of snacks

142 Bashta A., Ivchuk N., Bazhay-Zheherun S. The research of the technology of halva for health purpose

153 Adamchuk L., Postoienko H., Bal-Prylypko L., Dvykaliuk R., Antoniv A., Pylypko K. Research of the content of antibiotic residues in natural honey

163 Goyko I., Stetsenko N. Study of the influence of a phytocomposition with antioxidant properties on comprehensive assessment of yogurt quality

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF SPRAYING LIQUID USING CFD-TECHNOLOGIES

A. Sliusenko, V. Ponomarenko, S. Blazhenko, Ya. Khitriy

National University of Food Technologies

Key words:

CFD-modeling
Spray nozzle
Nozzle
Hydrodynamics
Spray jet

Article history:

Received 08.03.2022
Received in revised form
17.03.2022
Accepted 13.04.2022

Corresponding author:

A. Sliusenko
E-mail:
andriy_slyusenko@
ukr.net

ABSTRACT

In gas-liquid systems, the intensification of mass or energy exchange processes is possible by creating a significant area of the contact surface of the phases and quickly updating it by spraying the liquid with hydraulic nozzles. When installing them in equipment, it is necessary to know the characteristics of the spray jet in order to ensure the most efficient operation.

Such data are obtained during the experimental study of injectors. However, when changing the sizes, their ratios, additional studies are required, which require the availability of experimental stands, appropriate equipment, which are expensive and require considerable time for their implementation and processing of the results.

The most powerful program for the study of fluid dynamics of flows is the ANSYS system with CFD-modules. It is possible to investigate the structure of flows in the mixing chamber of the nozzle, at the outlet of nozzle, to foresee the phenomenon of spraying and destruction of the liquid jet. The main criterion for obtaining reliable simulation results is the correct setting of all calculation software modules.

The aim of the work is to determine the characteristics of the spray jet in the nozzle using CFD technologies as a progressive, highly efficient and economically viable research method.

An algorithm for numerical simulation of the hydrodynamics of the fluid flow in the nozzle and the exit from its nozzle was developed. It consists of six stages.

Numerical values of velocity and volume fraction of liquid for the spray torch, obtained by CFD modeling, correlate with known experimental data. It is established that a zone of the low-pressure of about 165 Pa is created inside the torch of the sprayed liquid (maximum in the root zone, decreases to the periphery and at a distance from the nozzle). The low-pressure zone explains the ejection of the gas phase from the outside into the middle of the spray torch.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ CFD-ТЕХНОЛОГІЙ

А. М. Слюсенко, В. В. Пономаренко, С. І. Блаженко, Я. С. Хитрий
Національний університет харчових технологій

У газорідинних системах інтенсифікація процесів обміну маси або енергії можлива при створенні значної площі поверхні контакту фаз і швидкому її оновленню шляхом розпилення рідини гідравлічними форсунками. При встановленні їх в обладнання потрібно знати характеристики факела розпилення, що дає змогу забезпечити найбільш ефективну роботу.

Такі дані отримують при експериментальному дослідженні форсунок, однак при зміні розмірів, їх співвідношень потрібні додаткові дослідження, які вимагають наявності експериментальних стендів, відповідного обладнання, є дорогими та потребують значного часу на їх проведення й обробку результатів.

Найпотужнішою програмою для дослідження гідродинаміки потоків є система ANSYS з CFD модулями, завдяки якій можна дослідити структуру потоків у камері змішування форсунки, на виході з її сопла, передбачити явище розпилення та руйнування струменя рідини. Основним критерієм отримання достовірних результатів моделювання є коректне налаштування всіх розрахункових модулів програмного забезпечення.

У статті визначено характеристики факела розпилення потоку у форсунці з використання CFD-технологій як прогресивного, високоефективного та економічно доцільного методу досліджень. Розроблено алгоритм проведення числового моделювання гідродинаміки потоку рідини у форсунці та на виході з її сопла, що складається із шести етапів.

Отримані CFD-моделюванням числові значення розподілення швидкості та об'ємної частки рідини для факела розпилення корелюють з відомими експериментальними даними. Встановлено, що всередині факела створюється розрідження порядку 165 Па, причому воно максимальне у прикореневій зоні, знижується до периферії і при віддаленні від сопла. Зона пониженого тиску пояснює ежектування газової фази ззовні всередину факела розпилення.

Ключові слова: CFD-моделювання, форсунка, сопло, гідродинаміка, факел розпилення.

Постановка проблеми. Розпилення рідин широко використовують у різних технічних пристроях як надзвичайно простий та ефективний метод прискорення перебігу тепло- і масообмінних процесів у газорідинних системах завдяки створенню значної площі поверхні контакту фаз, швидкому її оновленню.

З відомих способів розпилення найбільше використовують гідравлічний спосіб, що пояснюється низькими енерговитратами, високою надійністю роботи гідравлічних форсунок (розпилювачів), простотою їх конструкції, можливістю отримання дрібнодисперсних крапель. Основні типи гідравлічних форсунок: струминні, відцентрові, відцентрово-струминні.

Вибір того чи іншого типу розпилювача залежить від завдань, які розв'язують у конкретному обладнанні. Найбільш поширені відцентрово-струминні форсунок, в яких на виході із сопла утворюється факел розпилення з рівномірним розподілом крапель рідини, що дає змогу використовувати реакційний об'єм апарата з максимальною ефективністю. Такі форсунок застосовують для диспергування рідин у розпилювальних абсорберах під час перебігу тепло- і масообмінних процесів, спалювання рідкого палива в печах тощо.

Тривалий час єдиним способом оцінювання відповідності характеристик форсунок було виконання фізичних експериментів. Недоліки натурних досліджень розпилювачів (наявність відповідних дослідних стендів, оснащених точними приладами контролю й регулювання, довготривалість досліджень і оброблення результатів тощо) не гарантують масштабування лабораторних зразків до промислових. У разі зміни розмірів, їхніх співвідношень змінюватимуться і характеристики факела розпилення, що потребує додаткових досліджень для встановлення закономірностей роботи розпилювачів.

З розвитком методів чисельного моделювання та появою великої кількості прикладних програм, що ґрунтуються на математичному описі механізму розпадання струменя рідини на краплі (CFD — computational fluid dynamics), можливо виконати розрахунки витратних характеристик розпилювачів уже на етапі проектування та мати достовірні характеристики факела розпилення (дальність польоту краплі, кут розпилення, щільність зрошення), а також скоригувати розміри форсунок, що надає можливість забезпечити ефективну роботу обладнання, в якому їх встановлено.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідравлічні розпилювачі широко використовують як окреме обладнання або як основний його елемент для забезпечення інтенсивного перебігу процесів тепло- і масоперенесення. Важливий напрям застосування розпилювачів — використання їх у реактивних двигунах і двигунах внутрішнього згорання. Такі форсунок характеризуються незначними витратами та є найбільш дослідженими. В обладнанні хімічної та харчової промисловості гідравлічні форсунок використовують для розпилення великих обсягів технологічних неочищених рідин. Дослідженню таких форсунок приділено значно менше уваги.

Завдяки комп'ютерному моделюванню можна визначити характеристики факела розпилення рідини форсунок, які планується використати в обладнанні.

У (Ма та ін., 2016) розглянуто характеристики розпилення рідини з форсунок за низьких чисел Вебера. На основі проведеного чисельного моделювання встановлено, що потік рідини збігається з лагранжевою структурою частинок. Проте моделювання передбачає більш ранній розпад струменя рідини порівняно з експериментом.

Є. Тумановою здійснено дослідження гідродинаміки потоку в камері закручування відцентрово-струминної форсунок з центральним і тангенціальним підведенням рідини за допомогою програми FlowVision. Встановлено розподіл швидкості й тиску рідин у камері закручування і по радіусу сопла. На основі розрахунку траєкторії руху крапель з урахуванням зміни сили опору, яка діє на краплі зі сторони газового потоку, визначено щільність зрошення. При цьому розпад по-

току на виході із сопла не розглядався. Це пояснюється тим, що числовий розрахунок у такому програмному комплексі не дає змогу моделювати факел розпиленої рідини та оцінювати його дисперсність, оскільки в програмі не закладене врахування сили поверхневого натягу рідини та її взаємодії з навколишнім середовищем.

У (Montazeri, Blocken & Hensen, 2014; Dinc, Gray, Hillen, Taylor & Kuhlman, 2013) досліджується процес розпилення рідини без урахування геометрії форсунки. При цьому в розрахунковій області створюють певну точку та вказують, що саме з неї відбувається розпилення (точкове підведення енергії), а також задають тип і кут розпилення рідини, розмір крапель. На наш погляд, ці дослідження не враховують гідродинамічні явища в камері закручування форсунки, які значно впливають на параметри розпилення.

При дослідженні дисперсності розпиленої рідини (Zhao & Yang, 2012) використано модель дискретної фази (Discrete Phase Model, скорочено DPM). При налаштуванні параметрів цієї моделі задають мінімальний, максимальний і середній розмір крапель рідини. При цьому задається, що вже на виході із сопла форсунки рухаються краплі, а не суцільний потік. Однак при цьому не враховують первинний розпад струменя рідини, тобто перехід від моделі об'єму рідини до моделі дискретної фази (у програмі, в якій виконують дослідження, цей перехід називають Volume of Fluid to Discrete Phase Model, скорочено VOF to DPM).

У (Haq, Latif, Shafi & Javaid, 2018) використано гібридну модель багатофазної течії «VOF to DPM», яка комбінує дві моделі течії рідини: в рамках моделі VOF розраховують течію з вільною межею, а модель DPM підключають на другому етапі розрахунку, додаючи дискретні частинки в початкову постановку Ейлера. У межах одного розрахунку моделюють як первинний розпад потоку, так і подальший розпад крапель, процеси випаровування, фізичні та хімічні реакції. Результатом цієї роботи є найбільш повний опис процесу розпилення, але для виконання досліджень потрібні обчислювальні машини з високими технічними характеристиками.

Потрібно зазначити, що, незважаючи на прогрес, якого досягнуто у розвитку методів CFD протягом останніх років, точне моделювання процесу розпилення рідини залишається надзвичайно складним завданням, що зумовлено великою кількістю таких взаємопов'язаних явищ і механізмів, як первинний і вторинний розпад краплі, взаємодія крапель між собою, їх деформація, аеродинамічна сила, теплопередача, випаровування, поверхневий натяг рідини та її в'язкість (Helldorff & Micklow, 2019; Fung, Inthavong, Yang & Tu, 2012; Li & Soteriou, 2018). Для врахування цих факторів необхідно створити якісну розрахункову сітку, вибрати розрахункові моделі, коректно задати початкові і граничні умови та параметри розрахунку.

Мета дослідження: визначення характеристик факела розпилення потоку у форсунці при проведенні імітаційного моделювання з використанням CFD-технологій.

Матеріали і методи. Проведення чисельного моделювання процесу розпилення за допомогою CFD-технологій складається із шести етапів:

- створення геометричної моделі форсунки та середовища;

- створення та налаштування розрахункової кінцево-елементної сітки;
- визначення характеристик матеріалів, що використовуються в моделі;
- визначення початкових і граничних умов числової моделі;
- налаштування параметрів розрахунку, визначення методів обчислень;
- аналіз результатів розрахунку.

Для чисельного моделювання обрано відцентрово-струминну форсунку з профільованою вставкою (рис. 1).

У камері змішування форсунки рідина розподіляється на два потоки: один проходить через гвинтові канали й отримує тангенційну складову швидкості, а інший формується в результаті проходження частини рідини крізь осьовий отвір. У результаті взаємодії утворюється єдиний потік, який на виході із сопла форсунки розпадається з утворенням факела у вигляді заповненого конуса, що характерно для відцентрово-струминної форсунки.

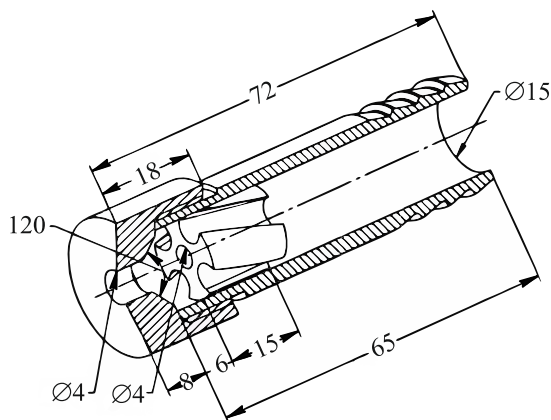


Рис. 1. Відцентрово-струминна форсунка з профільованою вставкою

Для реалізації поставленої мети в CAD-програмі було створено твердотільну тривимірну модель, що охоплює саму форсунку та зону витоку (умовно необмежений простір). Зона витоку має вигляд зрізаного конуса з кутом при вершині, який дорівнює прогнозованому куту розпилення рідини цією форсункою. Таку форму зони витоку створено з тих міркувань, щоб максимальна кількість розрахункових комірок розміщувалась у факелі розпилення. Файл з 3D-моделлю був імпортований у CFD-модуль програми ANSYS (академічна версія програми).

На другому етапі досліджень твердотільну тривимірну модель було розділено на розрахункову сітку (рис. 2) з комірок тетраїдальної форми. Дрібні комірки розміщені в області з високою концентрацією рідини, де виникнуть найбільші градієнти перенесення кількості руху та маси. Комірки більшого розміру розміщені поблизу зовнішніх стінок зони витоку рідини.

Слід також зауважити, що для розрахунку розміру крапель рідини у факелі розпилення розрахункову область потрібно розбивати на комірки розміром не більше ніж 0,1 мм (аналіз експериментальних даних свідчить, що розмір крапель рідини за тиску 0,3 МПа становить близько 270 мкм).

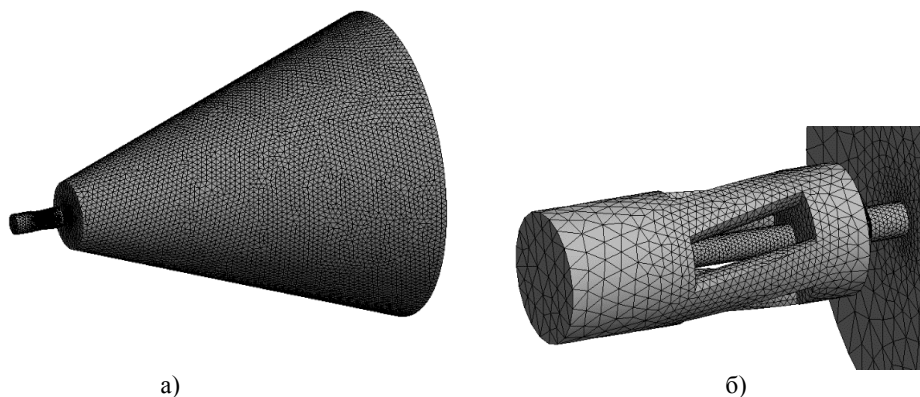


Рис. 2. Розрахункова сітка моделі:
а) — розрахункова область; б) — форсунка (збільшено)

Наступним кроком моделювання є встановлення параметрів матеріалів, початкових і граничних умов з подальшим налаштуванням параметрів розрахунку.

На цьому етапі досліджень виконано такі дії:

1. З бази даних завантажено параметри матеріалів (повітря та вода), які є робочим середовищем, та взято в розрахунок. Параметри навколишнього середовища в процесі розрахунку не змінювались — тиск атмосферний 101325 Па, температура 25°C, що відповідало умовам виконання експерименту.

2. Враховано прискорення вільного падіння.

3. Для замикання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують рух в'язкої нестисливої рідини, прийнято модель турбулентності $k-\epsilon$, яка забезпечує раціональне поєднання точності результатів розрахунку, його тривалість і вимоги до розрахункової сітки. У моделі $k-\epsilon$ використовується гіпотеза дифузії градієнта параметрів для того, щоб зв'язати напруження Рейнольдса з середньою швидкістю й турбулентною в'язкістю.

4. Обрано тип задачі — нестационарна «Transient». Встановлено тривалість розрахунку «Total Time» 0,5 с та часовий крок «Timesteps», який дорівнює 0,001 с.

Оскільки передбачається передача маси та енергії між середовищами, то для розрахунку взято багатозфазну модель Ейлера «Mixture», в якій фази розглядають як взаємопроникні континууми. За цього методу для визначення положення міжфазної межі використовують розподіл маркет-функції $C = f(x, y, z, t)$, яка є об'ємною часткою рідини в комірках розрахункової сітки: за умови $C = 1$ — комірка заповнена рідиною, за умови $C = 0$ — комірка порожня. Міжфазній межі відповідає ізоповерхня, де $C = 0,5$. Динаміку величини C описують рівнянням конвективного перенесення:

$$\frac{dC}{dt} \equiv \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = 0, \quad (1)$$

де $\mathbf{v}$ — швидкість середовища, м/с.

Рівняння збереження маси та кількості руху для системи рідина-газ розв'язують «наскрізь», як для одного середовища зі змінними властивостями матеріалів, які виражені через об'ємну частку рідини C .

5. Призначено кожній поверхні тривимірної моделі відповідні граничні умови. Це вхід рідини у форсунку (Inlet), стінка (Wall), яка являє, по суті, тіло форсунки та вихід рідини в умовно безмежний простір (Opening).

Для граничної умови Inlet задається значення масової витрати рідини (для прикладу розрахунку задано масову витрату 0,2 кг/с); об'ємна частка (Volume Fraction) води — 1, а повітря — 0. Враховуючи рекомендації з літературних джерел, прийнято такі параметри моделі турбулентності (кінетична енергія турбулентності k та швидкість дисипації кінетичної енергії ϵ): $k = 0,05\%$, $\epsilon = 10\%$. При спробі задати вхід води у форсунку через тиск розв'язок неможливий, оскільки програма зупиняється через критичну помилку, що можна пояснити відсутністю відповідних рівнянь перерахунку в цій моделі.

Для граничної умови «Opening» задано тип умови «Opening», яке означає, що вихід потоку рідини з сопла відбувається в атмосферу. В початковий момент часу в цій зоні знаходиться лише повітря, тому його значення «Volume Fraction» 1, а «Volume Fraction» для води в цій зоні — 0.

Для граничної умови «Wall» прийнято стандартні пристінкові функції.

На панелі «Solver» здійснюється додаткове налаштування параметрів розрахунків, зокрема підключено проведення розрахунку з подвійною точністю. Критерій збіжності результатів задано рівним 0,0001.

Після налаштування всіх необхідних параметрів проводиться розрахунок.

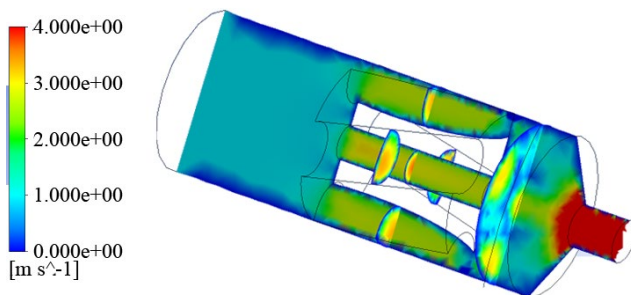
Викладення основних результатів дослідження. Обробка результатів розрахунку (масив даних із сіткової моделі, в якій для кожної комірки знайдені параметри потоку) дає змогу детально дослідити гідродинаміку рідини у форсунці та характеристики факела розпилення.

На рис. 3 показано розподілення швидкості рідини у форсунці при тиску рідини $P = 0,25$ МПа у вигляді контурного зображення (рис. 3, а) та графіка (рис. 3, б). Для точного визначення швидкості води у форсунці верхню межу шкали розподілу значень зменшено до 4 м/с (рис. 3, а).

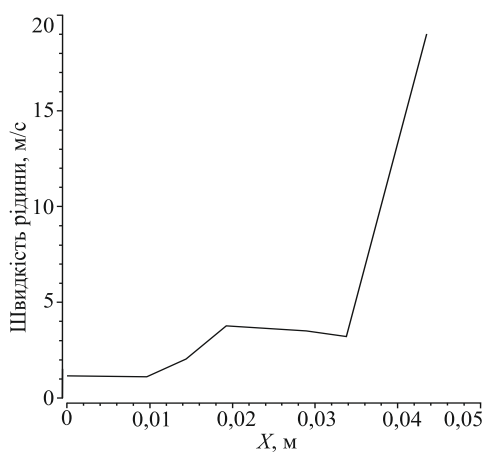
Аналіз приведених результатів показує, що рідина входить у форсунку (рис. 3, б) зі швидкістю 1,2 м/с, у гвинтових каналах профільованої вставки та осьовому отворі швидкість зростає до 3—3,5 м/с. У камері закручування форсунки вона знижується до 1,5—2,5 м/с, що пояснюється збільшенням площі поперечного перерізу. Максимальна швидкість 19,3 м/с досягається у соплі форсунки.

Важливим результатом досліджень є знайдене розподілення швидкості рідини по радіусу Z сопла (на його виході), яке представлено на рис. 4.

Визначити швидкість експериментально досить складно, оскільки в соплі відцентрово-струминної форсунки рідина має як обертальний, так і осьовий рух. Характер розподілення швидкості відповідає турбулентному руху рідини у вигляді параболічного профілю по поперечному перерізі.



а)



б)

Рис. 3. Розподілення швидкості рідини у відцентрово-струминній форсунці:
а) контурне зображення швидкості рідини; б) графік зміни швидкості рідини по осі форсунки X

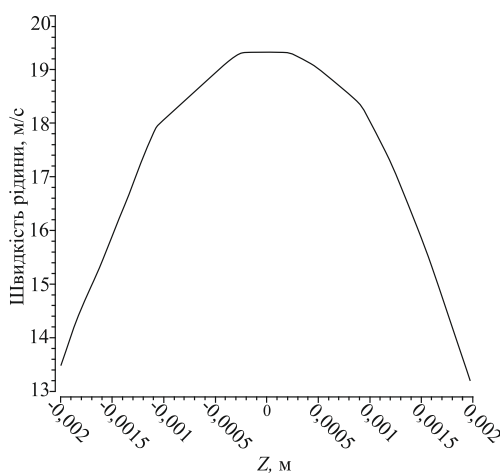
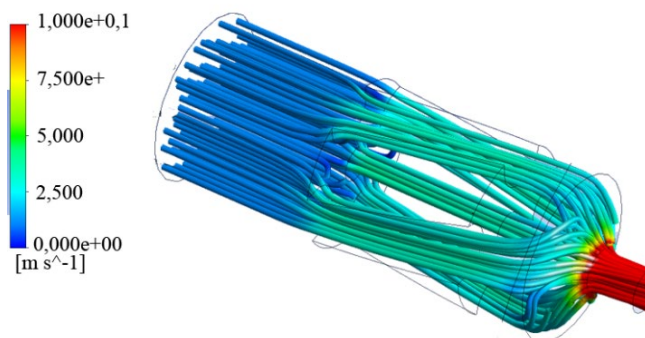


Рис. 4. Розподілення швидкості рідини по радіусу Z сопла (на його виході)

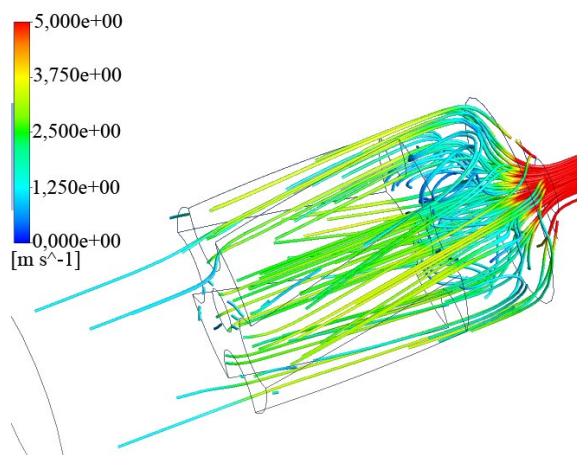
Картина течії рідини у відцентрово-струминній форсунці доповнена тривимірною візуалізацією ліній току (рис. 5):

- лінії току рідини у форсунці в діапазоні швидкостей 0—10 м/с (рис. 5, а);
- лінії току рідини в камері закручування в діапазоні швидкостей 0—5 м/с (рис. 5, б).

Аналіз приведених результатів показує, що рідина у гвинтових каналах вставки має тангенційну складову швидкості 3,5 м/с, а в центральному отворі вставки має осьову швидкість 3 м/с. Аналіз ліній току в камері закручування (рис. 5, б) показує взаємодію між двома потоками та формування єдиного у соплі.



а)



б)

Рис. 5. Лінії току рідини:

а) лінії току рідини у форсунці; б) лінії току рідини в камері закручування

При виході із сопла форсунки потік на невеликій відстані від нього розпадається на краплі та формує факел розпилення.

На рис. 6 представлено розподілення об'ємної частки (концентрації) рідини в розрахунковій області. Кут факела розпилення при заданих розмірах форсунки становить 26° .

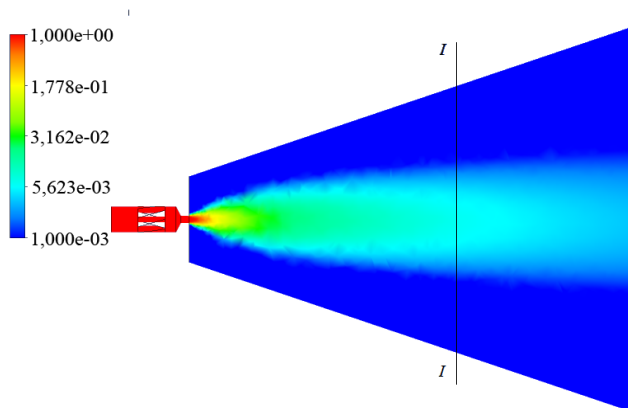
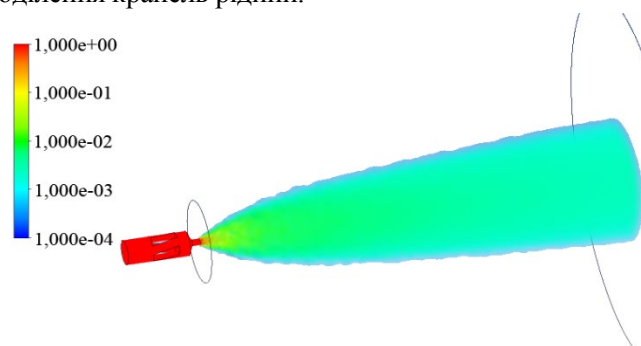
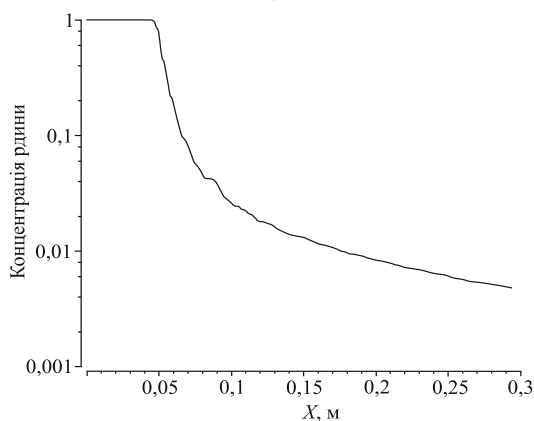


Рис. 6. Розподілення об'ємної частки рідини в розрахунковій області

Проаналізуємо більш детально розподілення об'ємної частки рідини в факелі розпилення (рис. 7). На відстані понад 0,15 м від зрізу сопла (0,2 м на рис. 7, б) зміна концентрації рідини по довжині факела є незначною, що свідчить про рівномірне розподілення крапель рідини.



а)



б)

Рис. 7. Розподілення об'ємної частки рідини у факелі розпилення:
а) тривимірне зображення; б) графік залежності концентрації рідини від довжини факела розпилення (по осі факела)

На рис. 8 приведено розподілення об'ємної частки рідини в поперечному перерізі факела розпилення на відстані 0,05 м, 0,1 м та 0,2 м від зрізу сопла, що дає змогу визначити щільність зрошення. При віддаленні від сопла спостерігається вирівнювання концентрації.

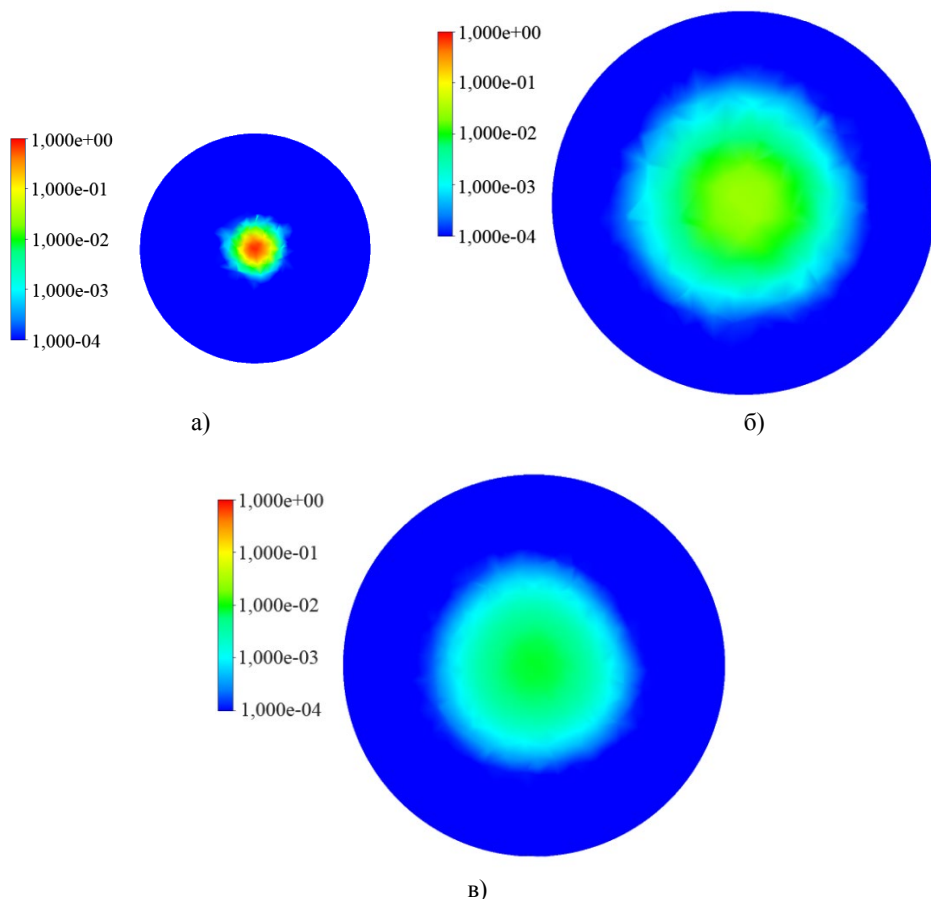
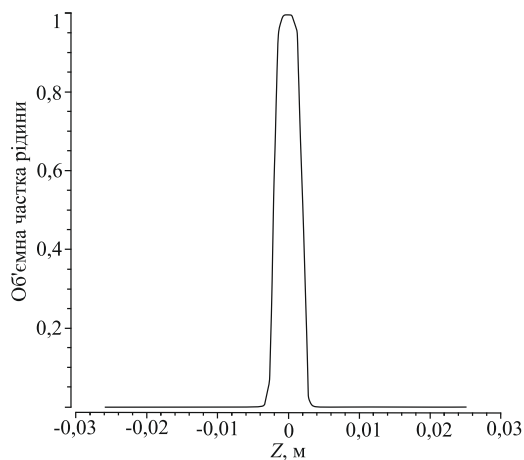


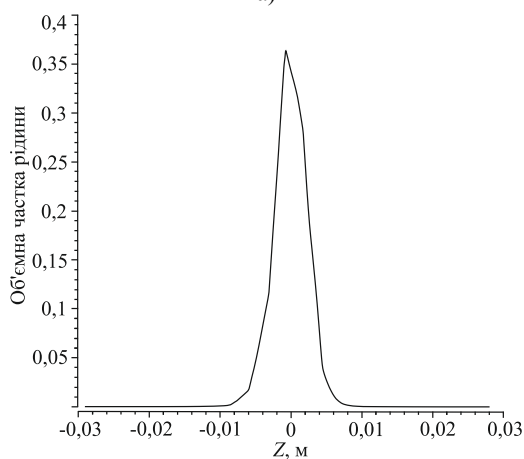
Рис. 8. Розподілення об'ємної частки рідини в поперечному перерізі факела розпилення на різній відстані від зрізу сопла:
а) 0,05 м; б) 0,1 м; в) 0,2 м

Результати моделювання у вигляді графіків залежності об'ємної частки рідини від радіуса Z факела розпилення на різній відстані від зрізу сопла представлені на рис. 9.

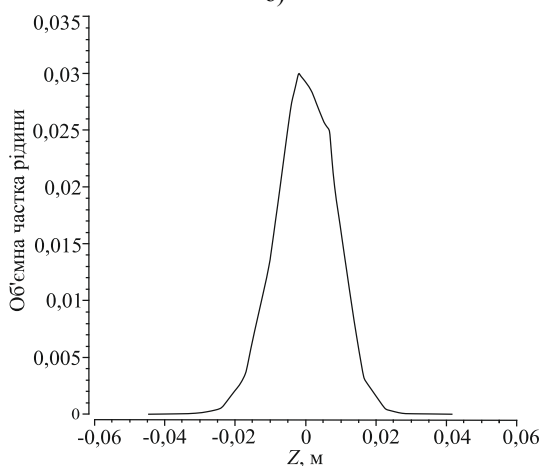
На рис. 10 приведено контурну заливку зі швидкості крапель рідини у факелі розпилення форсунки. Проведений аналіз результатів показав, що основна маса крапель рідини рухається в супутньому потоці в центральній частині факелу зі швидкістю біля 15 м/с. По периферії факела в результаті взаємодії з повітрям швидкість крапель знижується до 13—14 м/с.



а)



б)



в)

Рис. 9. Залежність об'ємної частки рідини від радіуса Z факела розпилення на різних відстані від зрізу сопла: а) 0,002 м; б) 0,02 м; в) 0,05 м

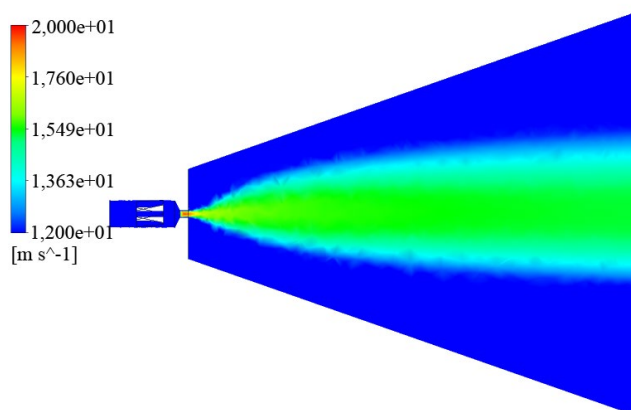
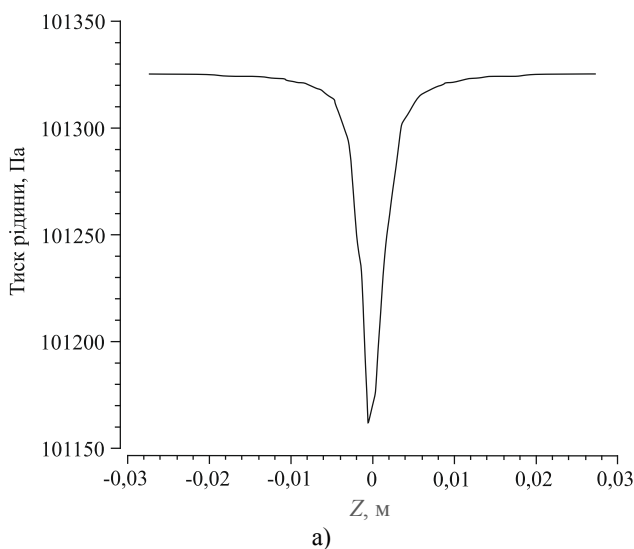
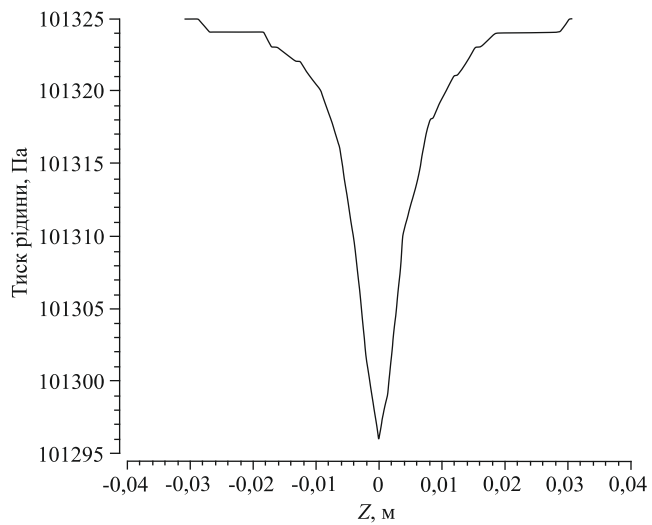


Рис. 10. Контурна заливка зі швидкості рідини у факелі розпилення форсунки

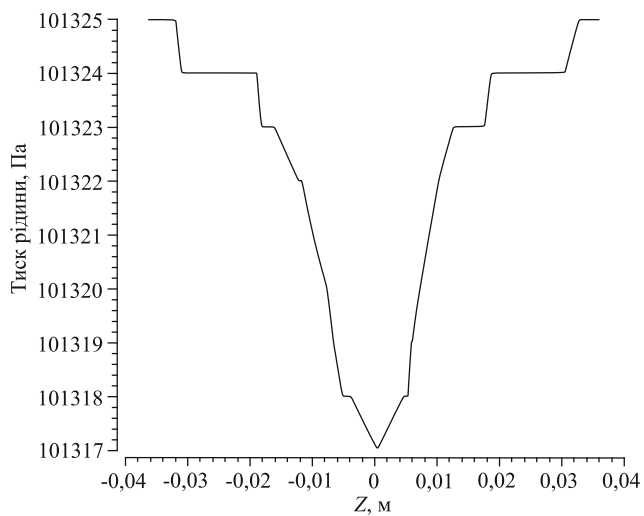
На рис. 11 представлено графіки залежності тиску у факелі розпилення від його радіуса Z на різній відстані від зрізу сопла. На відстані 0,005 м від зрізу сопла (рис. 11, а) в прикореневій зоні факела розпилення досягається максимальне розрідження 165 Па, яке на границі факела зростає до атмосферного.

При віддаленні від сопла в осьовому напрямку розрідження в середині факела розпилення знижується. Так, на відстані від зрізу сопла 0,015 м (рис. 11, б) максимальне розрідження становить 29 Па, на відстані 0,025 м — 8 Па (рис. 11, в), а на відстані 0,04 м — 5 Па (рис. 11, г). При подальшому віддаленні від зрізу сопла розрідження в факелі розпилення знижується до 2 Па, і на відстані понад 0,15 м зникає. Розрідження в центральній зоні факела розпилення викликає ежекцію повітря із зовнішньої області, де тиск вищий.

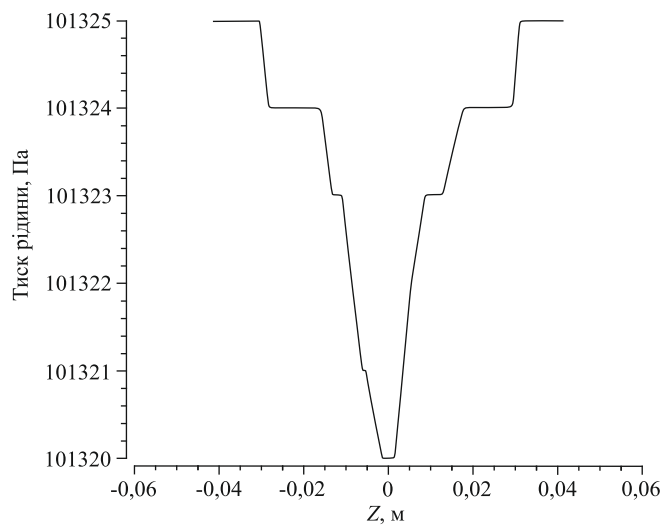




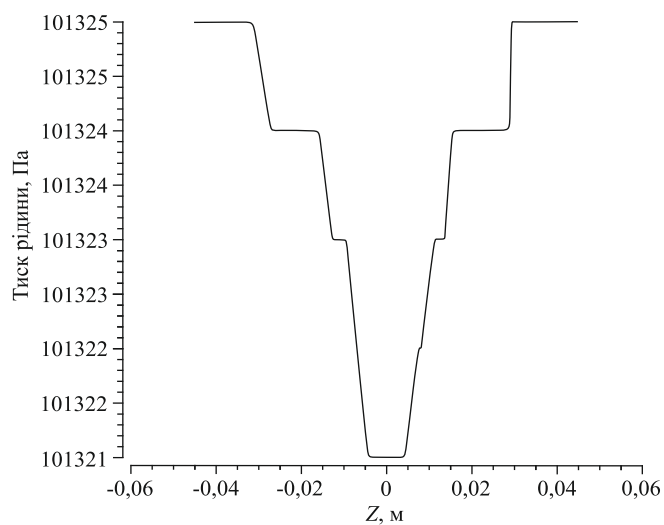
б)



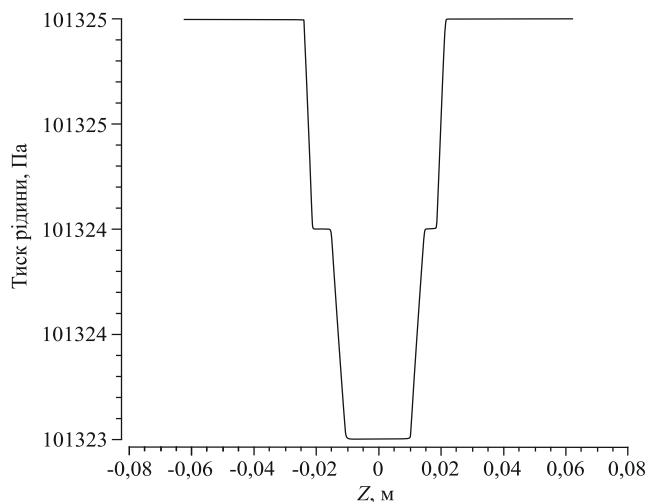
в)



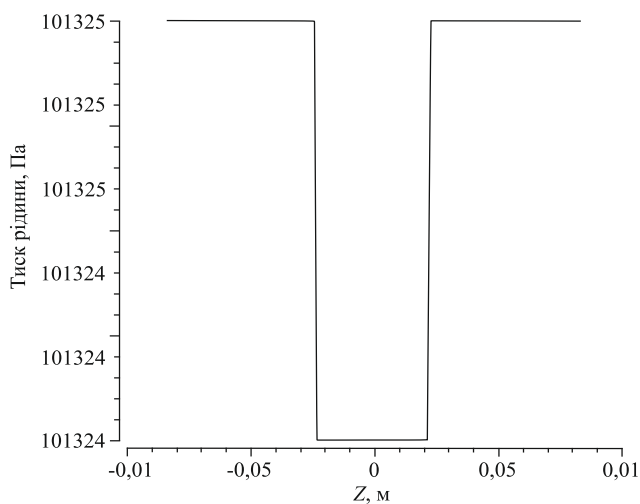
г)



д)



е)



е)

Рис. 11. Залежність тиску у факелі розпилення від його радіуса Z на різних відстані від зрізу сопла:

а) 0,005 м; б) 0,015 м; в) 0,025 м; г) 0,040 м; д) 0,05 м; е) 0,1 м; є) 0,15 м

Комп'ютерне моделювання роботи відцентрово-струминної форсунки вперше підтвердило той факт, що по осі факела розпилення рідини виникає розрідження, яке пояснює ежектування газової фази всередину. Причому його величина змінюється по довжині факела. Експериментально наявність розрідження

було виявлено лише на початку 2000-х років М. М. Сімаковим при дослідженні факела розпилення відцентрово-струминної форсунки з діаметром сопла 0,002 м.

Отже, за допомогою сучасного програмного забезпечення можна здійснити детальний аналіз гідродинаміки рідини у форсунці та визначити характеристики розподілу і форми факела розпилення.

Висновки

1. Розроблено методику (алгоритм) проведення числового моделювання гідродинаміки потоку рідини у форсунці та на виході з її сопла у програмному комплексі ANSYS CFD.

2. Проведено числове моделювання гідродинаміки рідини у форсунці і факела розпилення та отримані фізико-динамічні параметри процесу: основні зміни у факелі розпилення відбуваються на відстані до 0,15 м від зрізу сопла.

3. Контури швидкості та об'ємної частки рідини, отримані чисельними методами, корелюють з відомими експериментальними даними, що підтверджує коректність створеної моделі в ANSYS для проведення гідродинамічних досліджень у пристроях цього типу.

4. Вперше шляхом проведення комп'ютерного моделювання виявлено наявність розрідження у факелі розпилення, яке максимальне у прикореневій зоні факела (165 Па на відстані від зрізу сопла 0,005 м), знижується до його периферії і при віддаленні від зрізу сопла.

5. Наступним етапом досліджень буде визначення дисперсних характеристик рідини у факелі розпилення.

Література

Dinc, M., Gray, D., Hillen, N., Taylor J., Kuhlman J. (2013). *Spray Simulations to Support the Development of a Monte Carlo-Based Spray Cooling Model*, Materials of 43rd Fluid Dynamics Conference. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2975>.

Fung, M., Inthavong, K., Yang, W., Tu, J. (2012). CFD Modeling of Spray Atomization for a Nasal Spray Device. *Aerosol Science and Technology*, 46(11), 1219—1226. <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.704098>.

Haq, M., Latif, R., Shafi, I., Javaid, A. (2018). *Modelling Primary Atomization and its effects on spray Characteristics under Heavy Duty Diesel Engine Condition*, Materials of 21st Australasian Fluid Mechanics Conference. Australia: Adelaide. https://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/21/Contribution_702_final.pdf.

Helldorff, H., Micklow, G. (2019). Primary and Secondary Spray Breakup Modelling for Internal Combustion Engine Applications. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 6(4), 9882—9894. <http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42352901.pdf>.

Li, X., Soteriou, C. (2018). Detailed Numerical Simulation of Liquid Jet Atomization in Crossflow of Increasing Density. *International Journal of Multiphase Flow*, 104, 214—232. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.016>.

Ma, P., Esclapezy, L., Carbajal, S., Ihme, M., Buschhagen, T., Naik, S. ... Lucht, R. (2016). *High-Fidelity Simulations of Fuel Injection and Atomization of a Hybrid Air-Blast Atomizer*, Materials of 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2016-1393>.

Montazeri, H., Blocken, B., Hensen, J. (2014). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 83, 129—141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.022>.

Zhao, J., Yang, L. (2012). Simulation and Experimental Study on the Atomization Character of the Pressure-Swirl Nozzle. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2(4), 271—277. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2012.24A032>.