

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Андрій ЗАГОРУЛЬКО
(підпис)
_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 131 Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Комп'ютерна механіка», на тему: Числове моделювання руху гарячого димового потоку під впливом атмосферних факторів в програмному комплексі ANSYS.

Здобувача групи КМ.м-31 КИРИЛЕНКА Максима Руслановича.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Максим КИРИЛЕНКО
(підпис)

Керівник: доцент, к.т.н., доцент _____ Андрій ЗАГОРУЛЬКО
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра: 50 с., 23 рис., 7 табл., 13 джерел.

Мета роботи – дослідження поведінки димових потоків за різних граничних умов шляхом застосування сучасних програмних комплексів та експериментальних методів для визначення оптимальних параметрів утворення димової завіси.

Об’єкт дослідження: поведінка багатофазних потоків та параметри їх розповсюдження при різних граничних умовах.

Предмет дослідження – застосування обчислювальної гідродинаміки та експериментальних методів для моделювання і вимірювання параметрів димових потоків.

Методи дослідження – експериментальні методи дослідження, проведення вимірювання параметрів димового потоку, таких, як швидкість та температура; валідація результатів, порівняння експериментальних даних з результатами моделювання; чисельне моделювання, використання програмних комплексів для обчислення гідродинаміки та моделювання поведінки багатофазових потоків.

Розроблено методику оцінювання розповсюдження димового потоку в залежності від погодних умов, яка заснована на числовому моделюванні для аналізу поведінки багатофазних потоків при різних параметрах, таких як температура повітря, вологість, температура та кількості димових шашок. Використання програмних комплексів для обчислювальної гідродинаміки дозволяє прогнозувати важливі характеристики, зокрема розподіл температур і швидкість поширення диму, що є ключовими для ефективного контролю за його поширенням. Для перевірки результатів числового моделювання проводяться експериментальні вимірювання швидкості, витрати та температури димового потоку в реальних умовах. Це дозволяє уточнити модель і підвищити точність прогнозів.

БАГАТОФАЗНИЙ ПОТІК, ANSYS CFD, FLUENT, ЕКСПЕРИМЕНТ, ДИМ

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ..... | 6 |
| 1.1 Огляд літератури | 6 |
| 1.2 Постановка завдання..... | 13 |
| 1.3 Висновки | 14 |
| 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ, ВИТРАТ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ДИМОВОГО ПОТОКУ | 16 |
| 2.1 Проведення експерименту з використанням трубки Піто СЕМ D .. | 16 |
| 2.2 Проведення експерименту з використанням крильчатки та датчиків кутової швидкості..... | 18 |
| 2.3 Результати експерименту | 20 |
| 2.4 Висновки | 22 |
| 3 ВАЛІДАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ | 23 |
| 3.1 Валідація результатів експерименту з числовими дослідженнями . | 23 |
| 3.2 Висновки | 27 |
| 4 Числові дослідження димової завіси в атмосферному середовищі | 28 |
| 4.1 Розробка геометрії..... | 28 |
| 4.2 Підготовка геометрії та побудова розрахункової сітки | 31 |
| 4.3 Побудова розрахункової сітки..... | 31 |
| 4.3 Задання граничних умов..... | 34 |
| 4.4 Методика планування числового експерименту | 37 |
| 4.5 Результати розрахунків | 38 |
| 4.6 Обробка результатів..... | 40 |
| 4.7 Висновки | 44 |
| ВИСНОВКИ..... | 45 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 46 |
| Додаток А..... | 48 |

ВСТУП

Вивчення поведінки димових потоків у реальних умовах є важливим аспектом забезпечення безпеки в різних сферах діяльності, зокрема під час пожеж та маскувальних завдань. Одним із найефективніших інструментів для моделювання та аналізу динаміки диму є числове моделювання. Воно дозволяє досліджувати вплив різних атмосферних факторів, таких як температура повітря, швидкість вітру та вологість, на поведінку димового потоку. Важливою особливістю моделювання є використання чисельних методів, таких як метод об'ємів кінцевих елементів (FVM), для точного опису теплообміну, масопереносу та інших фізичних процесів, що відбуваються в димовому потоці.

Моделювання руху гарячого димового потоку під впливом атмосферних факторів за допомогою сучасних числових методів дозволяє розрахувати фізичні процеси, що відбуваються в димі. Окрему увагу приділено створенню геометрії моделі, яка відображає реальні умови навколишнього середовища, а також розрахунку рівнянь збереження маси, енергії та імпульсу, що дозволяють враховувати вплив турбулентності, конвекції та дифузії на рух диму. Моделювання дозволяє отримати візуалізацію розподілу температури, густини та насиченості повітря іншими газами, що є важливими для прогнозування поведінки диму.

Сучасні підходи до дослідження поведінки димових потоків вимагають використання високотехнологічних інструментів, зокрема програмних комплексів для обчислювальної гідродинаміки (CFD). CFD-моделювання надає можливість детального аналізу розподілу температур, швидкості поширення диму та інших ключових параметрів, що дозволяє прогнозувати його поведінку за різних граничних умов. Це особливо важливо для оптимізації систем димового захисту, підбору необхідної кількості димових шашок та контролю процесів розповсюдження диму. Крім того, явище множинності рішень для димових потоків підкреслює необхідність проведення комплексного аналізу для передбачення різних сценаріїв поширення диму.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Огляд літератури

Вдосконалення силових структур у провідних країнах світу та досвід їх використання високоточної зброї у сучасних військових конфліктах відображають стрімкий розвиток та застосування високоточної зброї. Ця зброя дозволяє ефективно виконувати оперативно-тактичні завдання та забезпечує успіх операцій. Першочергові удари високоточної зброї (ВТЗ) зазвичай спрямовані на важливі об'єкти сторони, що обороняється. Тому здатність військ ефективно протидіяти ВТЗ противника є критичною для успішного ведення бойових дій[1].

Застосування ВТЗ вимагає оперативного отримання інформації про противника, точного визначення координат цілей та місць розташування об'єктів. Зростання обсягів завдань, що вирішуються технічними засобами розвідки розвинутих держав, підкреслює необхідність комплексної протидії цим засобам. Одним із ефективних елементів такої протидії є димове маскування.

Стрімкий розвиток засобів ураження бронетехніки, зокрема протитанкових керованих ракетних систем (ПТКРС), поставив під сумнів ефективність традиційного бронювання танків та бойових машин. Збільшення товщини броні призводить до надмірного зростання маси, що негативно впливає на мобільність та маневреність техніки. Крім того, сучасні кумулятивні та тандемні боєприпаси здатні пробивати навіть багат шарову комбіновану броню[2].

Димове маскування включає організаційні та інженерно-технічні заходи щодо управління, постановки та підтримання димових завіс на вразливих об'єктах. Маскуючі суміші, за своїми фізико-хімічними властивостями, належать до дисперсних систем, у яких дисперсним середовищем є пара води, а

дисперсною фазою – зважені в ньому дрібні частки твердої, рідкої або газоподібної речовини.

В умовах збройних конфліктів, або операцій Збройних Сил України особливої уваги заслуговують проблеми зниження помітності переміщення військ, евакуаційних груп та їх захисту від вогневого впливу, зокрема від ВТЗ. Головною ідеєю є підвищення ефективності димового маскування в сучасних операціях та забезпечення відповідних можливостей цих підрозділів під час виконання завдань здебільшого евакуаційного характеру у бойових діях.

Аналіз технічних характеристик та засобів застосування ВТЗ свідчить, що використання димових завіс знижує уражаючий вплив цієї зброї та підвищує живучість військ. Для ефективного застосування ВТЗ необхідно мати точні дані про об'єкти, включаючи їхні координати, уразливі елементи та ступінь захищеності. Помилки у визначенні координат не повинні перевищувати кількох метрів. Димове маскування ускладнює отримання такої точної інформації противником, знижуючи ефективність його ВТЗ[1,2,3].

Аерозольне маскування використовується для захисту військ і об'єктів від виявлення та ураження повітряним і наземним противником. Це здійснюється шляхом створення аерозольних завіс, які забезпечують приховування реальних і хибних цілей від спостереження та ударів. Аерозольні завіси можуть створюватися для приховування об'єктів під час нальотів авіації або у визначений час, що дозволяє ефективно захищати підрозділи від авіаційних атак[3].

Маскування об'єктів за допомогою аерозольних (димових) завіс є ефективним способом протидії засобам розвідки та високоточної зброї противника. Створення таких завіс дозволяє приховати як реальні, так і хибні цілі, забезпечуючи захист техніки чи живої сили, під час маневрів або зосередження[4].

В роботі [5] представлено результати аналізу різних видів маскування, котрі ускладнюють, або взагалі унеможливають використання ВТЗ. Аерозольне маскування є одним із ключових елементів захисту військ від засобів

розвідки та ураження противника. У сучасних умовах важливим завданням є забезпечення ефективного, тривалого та маловитратного маскуванню підрозділів шляхом удосконалення існуючих систем. Аналіз систем аерозольного маскуванню, що перебувають на озброєнні як в Україні, так і в арміях західних країн-партнерів, показує, що сучасні іноземні аерозольні генератори забезпечують широкоспектральне маскуванню, але є дорогішими. Це вимагає розробки альтернативних рішень для ЗСУ.



а)



б)

Рисунок 1.1 Машини ТДА: а) ТДА-М та б)ТДА-2М

Для димового маскуваннтя використовують машини, котрі оснащуються системами термічно динамічної апаратури(ТДА), рисунок 1.1. Проте такі засоби маскуваннтя забезпечують лише обмежену ефективність. Вони залежать від режиму роботи двигуна, що знижує ефективність вироблення аерозольної завіси. Засоби маскуваннтя західних країн-партнерів забезпечують широкоспектральне маскуваннтя у видимому, інфрачервоному та радіолокаційному діапазонах, проте є високовартісними, що ускладнює їх масштабне застосування.

Маскуваннтя від наземного спостереження: Для захисту від вогневих засобів противника застосовуються лінійні аерозольні завіси, що можуть бути створені на фронтальних або флангових напрямках. Аналіз існуючих засобів, які є в наявності України та західних країн-партнерів, виявив певні недоліки, зокрема високу витратність та обмежену тривалість маскуваннтя[5].

Останніми роками, у зв'язку з покращенням характеристик розвідувальних систем (дальність дії, вірогідність виявлення та розпізнавання об'єктів), військові фахівці приділяють більше уваги маскуванню військ безпосередньо на полі бою. Це стосується сил та засобів, призначених для нанесення ударів по першочергових об'єктах противника, пунктів управління, позиційних районів ракетних та зенітних ракетних військ, резервів, аеродромів, переправ через водні перешкоди. Значна роль у вирішенні цих завдань відводиться аерозольним засобам маскуваннтя, які є універсальними, готовими до швидкого застосування та економічно вигідними.

Проводячи аналіз деяких джерел[6,7] можна відслідкувати тенденцію до розвитку використання сучасних програмних комплексів, тобто проведення числових експериментів. Для задовільної відповідності результатів моделювання з фізичними моделями, попередньо потрібно провести валідацію числових досліджень. В представлених роботах використовується саме порівняння моделювання з експериментальними температурними даними. В роботі [6], було використано дані з термопари, які були розташовані на оптимальній відстані від полум'я, щоб отримати більш надійні результати для моделювання рисунок 1.2.



Рисунок 1.2 – Проведення експерименту для моделювання

Створення нових або вдосконалення існуючих систем димового маскування є важливою інженерною задачею, що може бути забезпечена використанням димових шашок різного хімічного складу. Натурні випробування ефективності димових шашок є вартісною процедурою, що передбачає використання великої кількості шашок для накопичення статистики. Однак у сучасних умовах визначення параметрів розповсюдження димового потоку в залежності від атмосферних умов та складу шашки може бути виконано методами чисельного чи імітаційного моделювання, для використання яких є достатнім вимірювання обмеженої вибірки зразків на експериментальному стенді для визначення необхідних параметрів димового потоку[8].

У дослідженні[9] розглядається явище множинності рішень для димових потоків у будівлях з однаковою конфігурацією та умовами довкілля, що є важливим для управління димовими потоками та евакуацією людей під час пожежі. Зокрема, аналізується випадок однокімнатної будівлі з двома отворами, що піддається впливу протилежного вітру. Множинність рішень виникає через конкуренцію між вітровим тиском та температурною(термічною) підйомною

силою, що призводить до різних напрямків та інтенсивності димових потоків за однакових умов.

Використовуючи моделювання методом обчислювальної гідродинаміки (computational fluid dynamic-CFD), автори досліджують, як геометрія та розташування джерела вогню впливають на поведінку димових потоків. Результати показують, що розташування джерела вогню на підлозі призводить до найбільшого об'єму димового потоку в режимі, де домінує підйомна сила, тоді як джерела в кутах кімнати створюють найменший об'єм диму. Крім того, для підлогового джерела спостерігається більший критичний коефіцієнт підйомної сили та ширший діапазон потужності вогню, за якого існує множинність димових потоків.

Дослідження також виявило, що перехід між різними димовими потоками залежить від початкових умов та величини збурень у системі. Ці висновки мають практичне значення для розробки стратегій управління димовими потоками та забезпечення безпеки під час евакуації з будівель під час пожежі.

У дослідженні[10] розглядається явище множинності рішень для димових потоків у будівлях з однаковою конфігурацією та умовами довкілля, що є важливим для управління димовими потоками та евакуацією людей під час пожежі. Зокрема, аналізується випадок однокімнатної будівлі з двома отворами, що піддається впливу протилежного вітру. Множинність рішень виникає через конкуренцію між вітровим тиском та термічною підйомною силою, що призводить до різних напрямків та інтенсивності димових потоків за однакових умов.

Використовуючи моделювання методом обчислювальної гідродинаміки (CFD), автори досліджують, як геометрія та розташування джерела вогню впливають на поведінку димових потоків. Результати показують, що розташування джерела вогню на підлозі призводить до найбільшого об'єму димового потоку в режимі, де домінує підйомна сила, тоді як джерела в кутах кімнати створюють найменший об'єм диму. Крім того, для підлогового джерела

спостерігається більший критичний коефіцієнт підйомної сили та ширший діапазон потужності вогню, за якого існує множинність димових потоків.

Дослідження також виявило, що перехід між різними димовими потоками залежить від початкових умов та величини збурень у системі. Ці висновки мають практичне значення для розробки стратегій управління димовими потоками.

Документ[11] описує розробку моделі CFD для симуляції процесів утворення вогню та диму в вантажному відсіку літака під час пожежі. Модель здатна прогнозувати транспортування диму за різних умов, що дозволяє моделювати численні сценарії пожеж за короткий проміжок часу. Для цього використовуються рівняння збереження тепла, маси та імпульсу, розв'язані в програмному забезпеченні FLUENT для вдосконаленого CFD-моделювання.

Для перевірки точності моделі результати, отримані за допомогою FLUENT, порівнюються з експериментальними даними для вантажного відсіку літака 707, а також з результатами іншого CFD-коду, розробленого Sandia National Laboratories. Для перевірки чутливості результатів було створено три уточнені сітки, що дозволяє перевірити точність моделювання.

Чинні правила вимагають, щоб детектори диму у вантажному відсіку літака спрацьовували протягом 1 хвилини після початку пожежі. Однак випробування в польоті для демонстрації відповідності вимогам є дорогими та трудомісткими. Тому розробка обчислювальних інструментів для моделювання різних сценаріїв пожеж є важливою для оптимізації розташування детекторів диму та кількості пристроїв у вантажному відсіку перед сертифікаційними випробуваннями.

Експериментальні дані є основою для побудови моделей, що враховують всі важливі показники виділення тепла та хімічних речовин. Моделювання пожежі у вантажному відсіку з використанням CFD є потужним інструментом для аналізу пожежних ситуацій і дозволяє ефективно оцінювати різні сценарії для забезпечення пожежної безпеки.

Модель CFD є потужним інструментом для моделювання диму та аналізу пожеж, що дозволяє точно прогнозувати розвиток ситуації і оптимізувати

розташування детекторів диму, забезпечуючи відповідність вимогам безпеки та сертифікаційним стандартам.

1.2 Постановка завдання

Числове моделювання руху гарячого димового потоку під впливом атмосферних факторів в програмному комплексі ANSYS є важливим інструментом для дослідження та аналізу поведінки диму під час пожежі, особливо в умовах складних атмосферних явищ. В ANSYS можна використовувати чисельні методи для моделювання динаміки рідини та газів, таких як метод об'ємів кінцевих елементів (FVM), для моделювання теплообміну, масопереносу та інших фізичних процесів.

Для виконання завдань, поставлених у представленій роботі, в першу чергу необхідно визначити граничні умови системи, такі як температура, швидкість, в'язкість повітря, властивості димового потоку (середовище, що містить гази, тверді частки, пари), а також атмосферні умови (наприклад, температура повітря, швидкість вітру, напрямок вітру, вологість).

Наступним етапом роботи має бути створення геометрії моделі для числового розрахунку. Спочатку створюється геометрична модель, яка відображає реальні умови, такі як розміри навколишнього середовища, контури обтічної геометрії, а також розташування джерела утворення димового потоку. У моделі мають враховуватися також атмосферні фактори, такі як вітер, температура навколишнього середовища та температура джерела утворення маскувального потоку.

Наступним етапом у моделюванні буде розрахунок фізичних процесів за допомогою сучасних програмних комплексів. Для моделювання руху гарячого диму використовуються рівняння збереження маси, енергії та імпульсу. Ці рівняння дозволяють враховувати теплообмін між димом і навколишнім середовищем, а також процеси дифузії та конвекції. Розв'язуються рівняння

Нав'є-Стокса для опису руху рідин та газів, а також рівняння для температури та концентрації компонентів диму (CO, CO₂, сажа тощо).

Атмосферні фактори, такі як вітер, температура та вологість, мають значний вплив на рух димового потоку. Під час розрахунку потрібно враховувати змінну швидкість вітру, конвекційні потоки та термічні градієнти, які змінюються з часом. Рівняння Нав'є-Стокса для газового потоку використовуються для моделювання динаміки руху диму. У випадку турбулентних потоків застосовуються моделі турбулентності, такі як k - ϵ або k - ω , що описують поведінку енергетичних та дифузійних характеристик потоку.

Після завершення моделювання потрібно провести аналіз результатів, який може включати візуалізацію руху диму, температурних полів, а також концентрації газів. Результати допомагають зрозуміти, як дим поширюється в середовищі та які фактори впливають на його рух. Останнім етапом є аналіз отриманих результатів та формування висновків. За необхідності модель може бути уточнена для більш точної оцінки.

1.3 Висновки

Аналіз представлених робіт свідчить про важливість використання сучасних програмних комплексів для обчислювальної гідродинаміки (CFD) при моделюванні поведінки диму за різних граничних умов. CFD-моделювання дозволяє прогнозувати розподіл температур, швидкість поширення диму та інші критичні параметри, що є ключовими для прогнозування його поведінки, контролю або підбору оптимальної кількості димових шашок для успішного виконання завдань.

Дослідження різних літературних джерел показують, що конфігурація джерел диму та їх розташування можуть суттєво впливати на динаміку димових потоків. Крім того, існує явище множинності рішень для димових потоків за однакових умов, коли різні початкові умови або незначні зміни можуть призвести до різних сценаріїв поширення диму. Це підкреслює необхідність

ретельного аналізу та моделювання для передбачення можливих ситуацій і розробки відповідних заходів.

Загалом, застосування CFD у дослідженні поведінки диму є потужним інструментом для контролю за його розповсюдженням та ефективного керування системами димових завіс за різних погодних умов.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ, ВИТРАТ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ДИМОВОГО ПОТОКУ

2.1 Проведення експерименту з використанням трубки Піто СЕМ D

Експериментальні дослідження є важливим етапом для вивчення характеристик димового потоку та валідації числових моделей. Основна мета таких досліджень полягає у вимірюванні ключових параметрів, які визначають поведінку диму: швидкість руху, витрати та температуру.

Для дослідження характеристик димового потоку було розроблено випробувальний стенд рисунок 2.1[8].

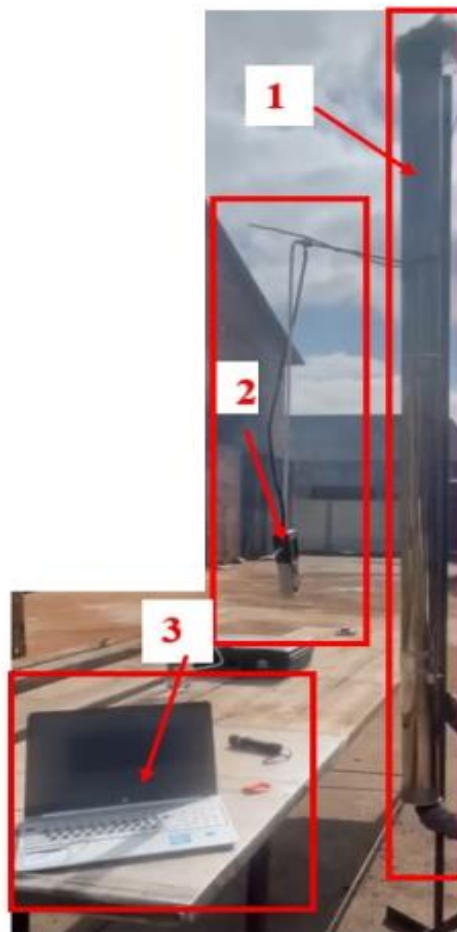


Рисунок 2.1 Стенд для дослідження характеристик димового потоку

В основі дослідження була використана методика відповідно до ДСТУ 8725:2017 (рис 2.3) [12] для визначення швидкості газових потоків та витратних характеристик на основі визначення об'ємних витрат за одиницю часу.

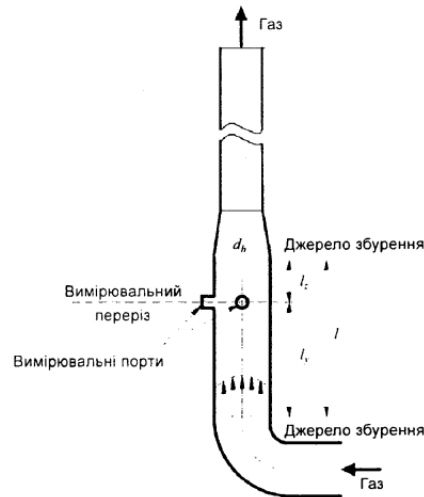


Рисунок 2.3 – Схема розташування вимірювальної секції та вимірювального перерізу на газоході відповідно до ДСТУ 8725-2017

Дослідження проводилося на стенді для вивчення характеристик димового потоку (рис. 2.2), який складається з:

- 1 – труба з нержавіючої сталі;
- 2 – СЕМ DT-8920 (вимірювач швидкості повітря);
- 3 – персональний комп'ютер для оброблення даних, отриманих з дифманометра-вимірювача швидкості потоку.

Використовуючи рекомендації, викладені у ДСТУ, було визначено геометричні параметри дослідної установки. Зокрема, для забезпечення встановлення однорідного потоку без збурень та зворотних потоків газу було застосовано напрямну ділянку довжиною 2300 мм.

Основним джерелом димової маси слугувала димова шашка, в якій внаслідок хімічної реакції відбувається утворення диму. Відповідно до стандарту ДСТУ 8725:2017, довжина металеві труби становила 10 діаметрів. Основні розміри та деталі геометрії представлені на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Схема розмірів труби з нержавіючої сталі

Під час проведення експерименту з використанням дифманометра з трубкою Піто SEM DT-8920 було виявлено, що утворення твердих часток під час горіння димової шашки призводить до появи нагару в трубці Піто. Це забруднення перешкоджає точному вимірюванню параметрів димового потоку. Нагар, що утворюється, засмічує чутливі елементи трубки Піто, ускладнюючи вимірювання перепаду тиску по обидва боки звужуючого пристрою, що, в свою чергу, унеможлиблює отримання правильних результатів розрахунків швидкості потоку та витрату диму. Додатково виникає проблема через високу температуру потоку диму ($220\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$), що також впливає на точність вимірювань. Зважаючи на ці труднощі, було прийнято рішення змінити тип датчика, щоб він був менш чутливий до нагару та температури димового потоку. Як альтернативу було запропоновано нову конструкцію програмно-апаратної системи: металева крильчатка, датчик частоти обертання, дві термопари хромель-алюмель, аналого-цифровий перетворювач і комп'ютер для обробки інформації[8].

2.2 Проведення експерименту з використанням крильчатки та датчиків кутової швидкості

Для нового дослідного стенду була обрана нержавіюча труба, на верхній частині якої встановлено металеву крильчатку з датчиком для вимірювання



Рисунок 2.5 Розміщення металевої крильчатки у отворі труби

обертів цієї крильчатки (рис. 2.5). Ця частина конструкції дозволяє визначати швидкість та витрату димового потоку, виконуючи автоматичний розрахунок за допомогою програмного забезпечення (рис.2.6).



Рисунок 2.6 Стенд для дослідження характеристик димового потоку: 1- крильчатка з термопарою; 2-термопара; 3-цифровий перетворювач

Для вимірювання температури димового потоку були використані дві термопари хромель-алюмель, під'єднані через цифровий перетворювач, і розташовані в верхній та нижній частинах нержавіючої труби (рис.2.6).

2.3 Результати експерименту

В результаті досліджень були отримані залежні від часу значення температури та швидкості димового потоку. Графіки, що показують залежність швидкості та температури від часу утворення диму, наведені на рисунок 2.7 та рисунок 2.8 відповідно.



Рисунок 2.7 Відображення залежності швидкості димового потоку від часу димоутворення

З графіків видно, що максимальна швидкість димового потоку становить 5,91 м/с, що підтверджує коректність результатів, отриманих за допомогою розробленого стенду.

Максимальна температура в верхній частині труби (на виході димового потоку) досягає 330 °С, а в нижній частині (біля місця горіння димової шашки) — 160 °С. Це свідчить про точність вимірювань, проведених за допомогою

стенду, оскільки термопара, розташована біля димової шашки, фіксувала температуру навколишнього середовища.



а)



б)

Рисунок 2.8 Залежність часу димоутворення від температури димового потоку:

а) – верхня частина труби; б) – нижня частина труби.

Розробка цього дослідного стенду та реалізація його конструктивних особливостей дозволили здійснити синхронізовані вимірювання швидкості,

температури та витрати димового потоку за допомогою персонального комп'ютера.

2.4 Висновки

У представленому розділі роботи було проведено дослідження, для автоматичного вимірювання швидкості, витрати та температури димового потоку. Завдяки комплексному підходу вдалося створити конструкцію стенду на основі вимог ДСТУ 8725:2017 та провести його випробування.

Під час перших дослідів було виявлено, що дифманометр з трубкою Піто не забезпечує точність вимірювань параметрів димового потоку через значний негативний вплив нагару, що утворюється при горінні димової шашки, на чутливі елементи приладу.

У результаті було розроблено програмно-апаратний комплекс, який дозволяє зчитувати дані з датчиків частоти обертання крильчатки та двох термопар хромель-алюмель. Це дозволило визначати швидкість, температуру та витрату димового потоку протягом усього періоду горіння шашки.

3 ВАЛІДАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Валідація результатів експерименту з числовими дослідженнями

Для підтвердження достовірності отриманих експериментальних даних було проведено валідацію результатів за допомогою числового експерименту. Основна мета цього етапу полягала у порівнянні експериментальних результатів із числовими даними для перевірки точності моделі та її відповідності реальним фізичним процесам.

Для моделювання багатофазного потоку в трубі було обрано програмний комплекс Ansys Fluent на основі літературного огляду, присвяченого подібним дослідженням [11].

Для створення геометрії було використано Ansys DesignModeler, застосовуючи розміри, наведені в попередньому розділі, та додаючи геометрію навколишнього середовища. Було побудовано дві геометрії із заданням назв стінок: вхідної та вихідної поверхонь труби, а також усіх інших стінок, яким було присвоєно назву Opening за винятком нижньої (землі). Труба створювалася за допомогою інструменту Sweep, шляхом обертання кола навколо осьової лінії.

У модулі Ansys Meshing було побудовано розрахункову сітку, використовуючи метод Sweep для осесиметричної геометрії, із застосуванням алгоритму Axisymmetric. Кількість поділів сітки по радіусу було встановлено на 20 елементів. Для уточнення зовнішніх елементів застосовувалася опція адаптивного налаштування розміру (adaptive sizing), а роздільна здатність була встановлена на рівні 5.

Було перевірено правильність назв поверхонь: поверхню входу позначено як Inlet, поверхню виходу — як Outlet, стінки труби та нижню поверхню середовища — як Wall. Решта стінок були позначені як Opening. Після чого, було передано сітку до Ansys Fluent.

При налаштуванні розв'язувача Ansys Fluent було обрано опцію подвійної точності (double precision) та використано 4 процесори для розпаралелювання

розрахунків. Спочатку виконано перевірку сітки в розв'язувачі, переконавшись, що мінімальний об'єм не є від'ємним.

Обрано нестационарний розв'язувач (transient solver) та увімкнено опцію врахування гравітації, задавши прискорення в негативному напрямку осі Y. У матеріалах додано властивості повітря з бази даних Fluent. У моделях задано багатофазну модель Volume of Fluid (VOF) з чотирма фазами: повітря (primary) та диму (secondary). Увімкнено опцію Implicit Body Forces для врахування сил тяжіння та поверхневого натягу.

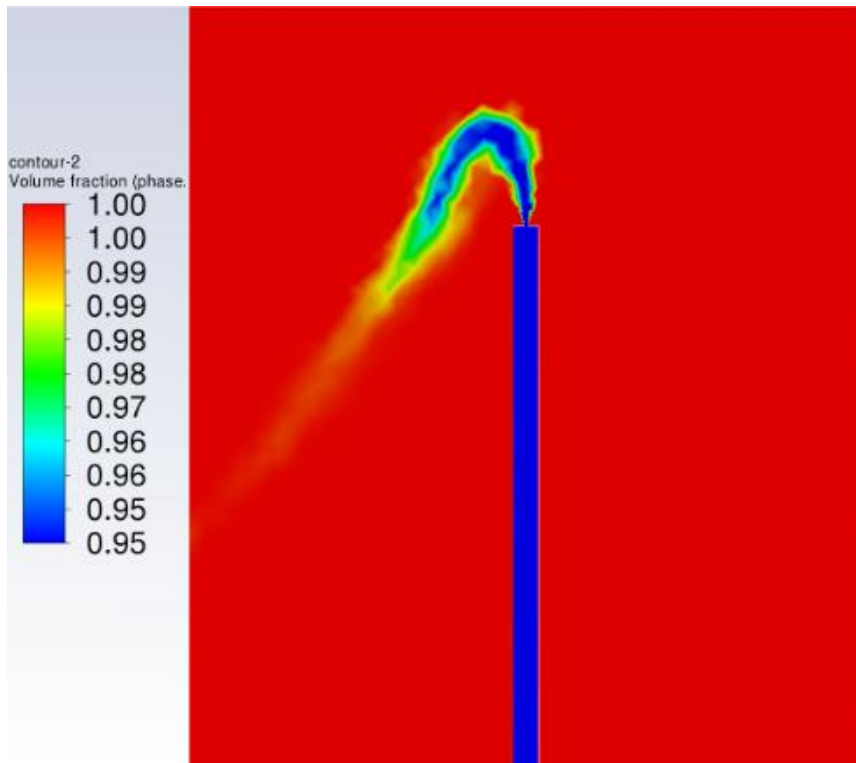
Встановлено коефіцієнт поверхневого натягу та активовано опцію прилипання до стінок (wall adhesion) для корекції кривизни поверхні диму біля стінок. У в'язкісній моделі обрано модель турбулентності k-epsilon, яка підходить для моделювання потоків у в'язкому підшарі. Також задано граничні умови: встановлено швидкість та температуру диму на вході (Inlet) труби та використано значення інтенсивності турбулентності та в'язкісного відношення за замовчуванням.

Для фази повітря об'ємну частку на вході встановлено рівною 1, що означає, що на початку розрахунку присутнє лише повітря. Під час налаштування методів розрахунку використано схему зв'язку тиску та швидкості PISO, яка підходить для нестационарних симуляцій та потребує менших обчислювальних ресурсів. Обрано дискретизацію другого порядку для підвищення точності розв'язку.

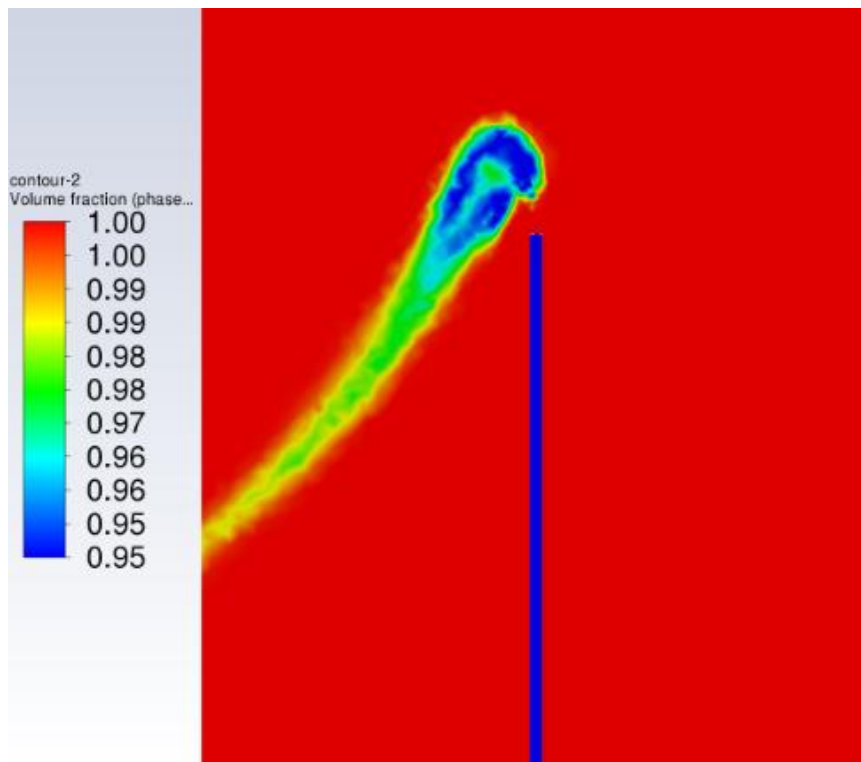
На етапі ініціалізації об'ємну частку диму встановлено рівною 0, щоб початково домен був заповнений повітрям. У налаштуваннях розрахунку задано автоматичне збереження результатів кожні 50 ітерацій.

Для створення анімації потоку було обрано відповідні контури та параметри, додатково створивши опорну площину на площині YZ при $X=0$ (центр труби).

В результаті було отримано об'ємну частку диму в повітряному середовищі (рисунок 3.1).



a)



б)

Рисунок 3.1 - Об'ємна частка диму в повітряному середовищі: а) – переріз по центру труби; б) – переріз на відстані 30 мм від центру труби

Також було отримано розподіл температури рисунок 3.2

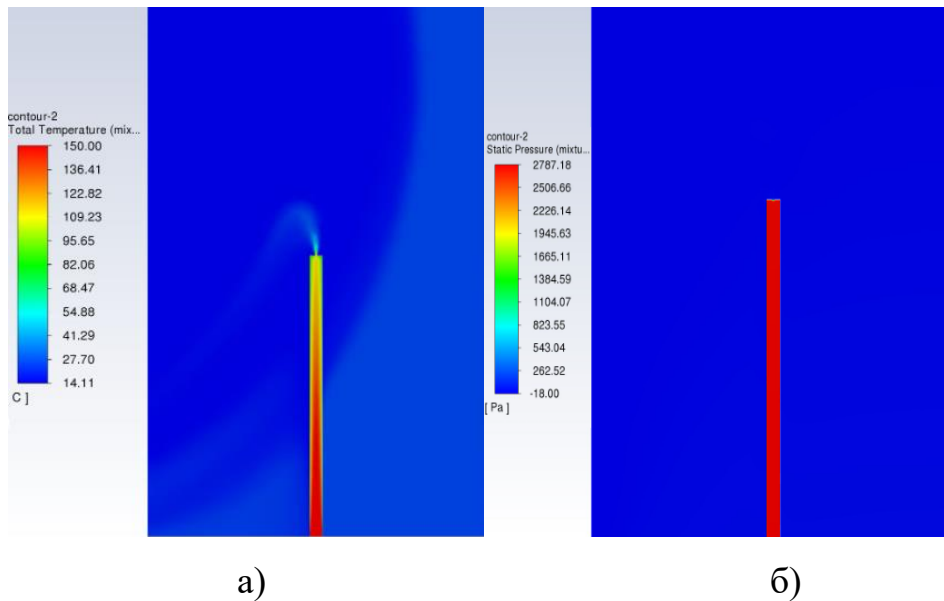


Рисунок 3.2 – Розподіл температури в повітряному середовищі: а) – переріз по центру труби; б) – переріз на відстані 30 мм від центру труби

Числове моделювання виконано з використанням сучасних методів CFD (Computational Fluid Dynamics), зокрема програмного забезпечення, що дозволяє моделювати складні газодинамічні процеси, такі як утворення та поширення димових мас. Проведено валідацію результатів, зокрема аналіз змін температури у контрольних точках, що дозволило оцінити динаміку теплового впливу в експериментальних умовах. Вимірювання швидкості потоку у напрямній ділянці порівняно з розрахунковими значеннями. Також досліджено поведінку димового шлейфу під час чисельного експерименту; проте у фізичному експерименті такі результати оцінити складно. Порівняння значень виявило високий ступінь збігу між експериментальними та числовими даними: максимальне відхилення температурних показників не перевищувало 5%, що свідчить про надійність використаної моделі. Швидкість потоку у напрямній ділянці узгоджується з точністю до 3%.

3.2 Висновки

Валідація експериментальних результатів за допомогою числових досліджень підтвердила коректність обраної методики та дозволила оцінити точність отриманих даних. Це свідчить про можливість використання розробленої моделі для подальших досліджень поширення диму та температурного впливу.

4 Числові дослідження димової завіси в атмосферному середовищі

Формування димової завіси є важливим тактичним прийомом, що може бути використаний для маскування переміщення автомобільного транспорту під час різних операцій, зокрема в умовах бойових дій або спеціальних операцій. Димова завіса дозволяє знижувати видимість для спостерігачів та засобів спостереження, що у свою чергу підвищує безпеку транспорту, що рухається, а також може забезпечити приховане переміщення техніки чи особового складу[8].

У приведеній роботі представлені дослідження характеристик димових шашок, застосованих до легкової машини типу пікап, з метою аналізу їх ефективності за різних граничних умов. Такий підхід дозволяє детально вивчити вплив параметрів димової завіси на маскування переміщення транспорту в умовах змінних факторів, таких як швидкість вітру, температура навколишнього середовища та інші змінні умови.

1.1 Розробка геометрії

Для побудови моделі геометрії пікапу в SolidWorks спочатку відкривають нову деталь і вибирають основну площину для побудови ескізу. Для зручності роботи завантажується зображення пікапу, яке використовується як орієнтир. Зображення розміщують на площині, масштабують та фіксують.

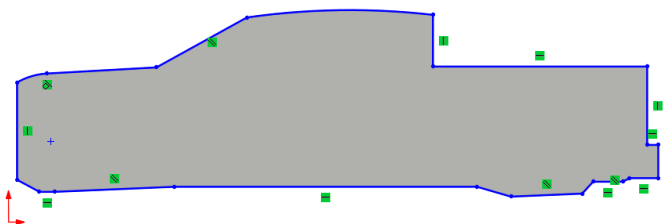


Рисунок 4.1 Побудова ескізу моделі машини

Далі створюється ескіз бокової проєкції кузова, використовуючи інструменти для побудови ліній, дуг і сплайнів. На цьому етапі форму залишають максимально простою та блоковою, щоб спростити подальшу роботу. Після завершення ескізу його екструдовують для отримання тривимірної моделі кузова, задаючи ширину екструзії, наприклад, 2005 мм.

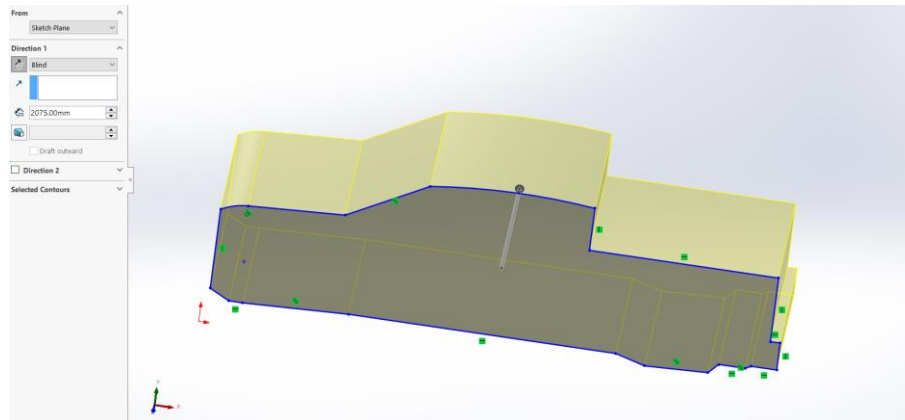


Рисунок 4.2 Видавлювання ескізу на задану відстань

Наступним етапом є деталізація моделі. Кабіну формують шляхом створення нового ескізу на верхній площині кузова. Прямокутник, що відповідає розмірам кабіни, екструдовують на необхідну висоту. Багажний відсік створюється за допомогою вирізання частини об'єму кузова, використовуючи команду *Extruded Cut*.

Колісні арки додаються через побудову ескізу на боковій площині кузова. Використовуються кола, які вирізаються для формування отворів під арки. Після цього арки дзеркально копіюють на протилежний бік кузова.

Для створення даху кабіни додається новий ескіз на верхній площині, який екструдовують до потрібної висоти. Вікна формуються шляхом вирізання отворів у стінках кабіни за допомогою інструментів для вирізання.

На завершальному етапі виконують округлення країв кузова, даху та арок для додання моделі більш реалістичного вигляду. Використовується команда *Fillet*, де задається радіус округлення. Декоративні елементи, такі як решітка

радіатора, фари чи ручки, додаються через побудову додаткових деталей
 рисунок 4.3.

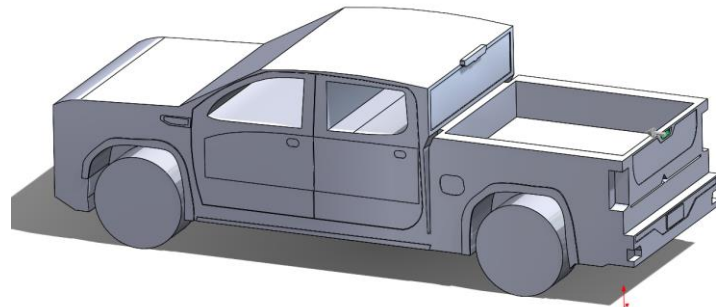


Рисунок 4.3 3-D модель пікапу для дослідження

Модель завершується призначенням кольорів для візуальної наглядності (рисунок 4.4). Додатково позначаються місця розміщення димових шашок, наприклад, у вигляді циліндрів позначених стрілочками. У програмі SolidWorks можна також задати матеріали, але в даному випадку акцент зроблено на моделюванні обтікання геометрії, тому ці деталі не мають значного впливу. Модель зберігається у форматі SolidWorks (.SLDPRT) або експортується у формат STL для забезпечення сумісності з програмним комплексом Ansys. Після передачі геометрії в Ansys виконується перевірка за допомогою інструментів оцінки, щоб переконатися в її цілісності та відсутності помилок.

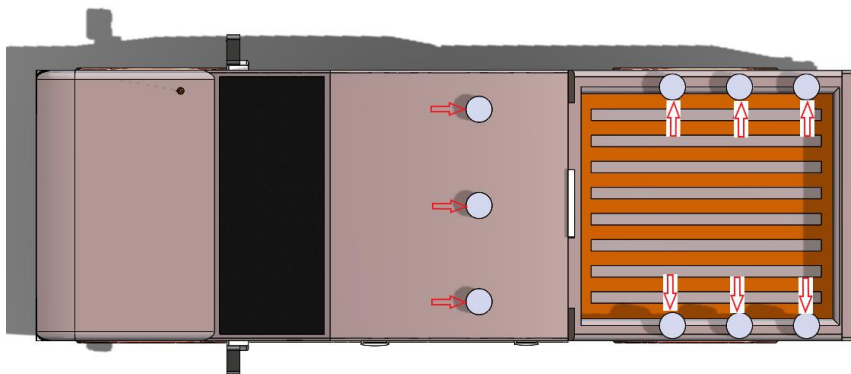


Рисунок 4.4 – Розрахункова геометрія з відображенням місць встановлення
 димових шашок

1.2 Підготовка геометрії та побудова розрахункової сітки

Для підвищення точності моделювання в обчислювальній гідродинаміці (CFD) важливо забезпечити адекватну дискретизацію сітки, особливо в областях поблизу стінок об'єкта, де можуть виникати значні градієнти параметрів потоку. Згущення сітки в цих зонах дозволяє краще описати пристінкові шари та підвищити точність розрахунків.

Розділення геометрії на декілька частин дозволяє застосувати різні стратегії побудови сітки до кожної зони, забезпечуючи більш детальну дискретизацію в критичних областях рисунок 4.5.

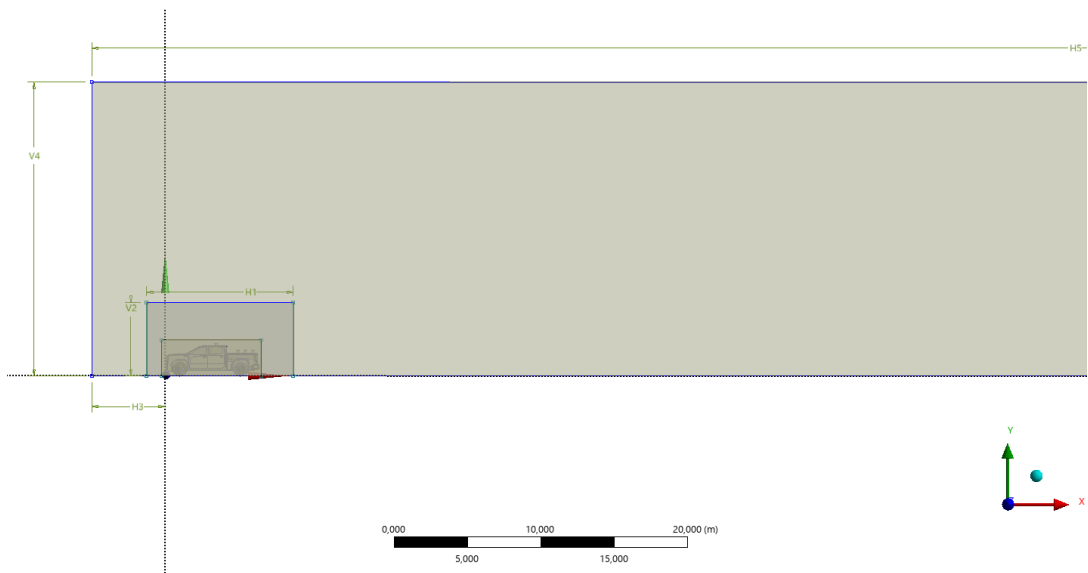


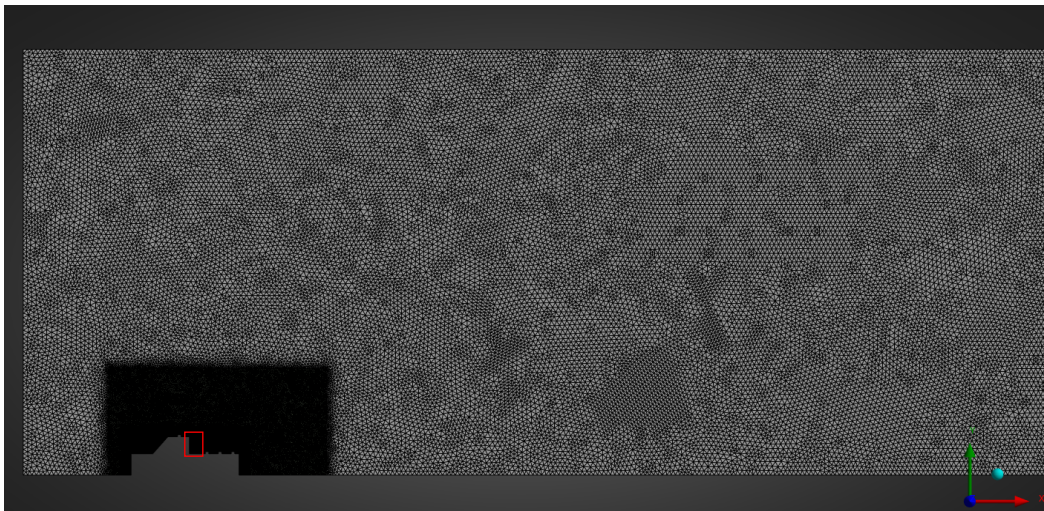
Рисунок 4.5 Розбиття геометрії в DesignModeler

4.3 Побудова розрахункової сітки

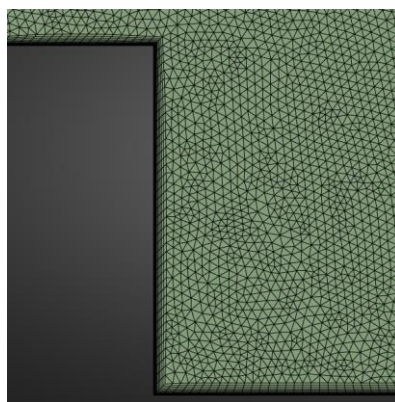
Об'ємна модель розбивається на кінцеві тривимірні елементи для числового моделювання та аналізу багатофазного потоку. Цей процес дозволяє наближено вирішити рівняння фізичних процесів, таких як рух рідин або газів, у складних геометричних областях. У програмі ANSYS Meshing для створення

розрахункової сітки використовують метод тетраедрів із застосуванням алгоритму Patch Conforming.

Метод тетраедрів є ефективним для моделювання складних геометрій, таких як вирізи, канали або кути з округленнями. Він дозволяє отримати більше елементів (комірок) в порівнянні з іншими методами, наприклад, використанням квадратичних елементів з еквівалентним розміром. Це важливо для досягнення високої точності в областях з високими градієнтами, де потрібне детальне описання геометрії. Тетраедри, завдяки своїй формі, забезпечують кращу здатність до адаптації до складних геометричних форм, що дозволяє моделювати навіть найдрібніші деталі.



а)



б)

Рисунок 4.6 Розрахункова сітка моделі: а) розрахункова сітка моделі; б) сітка в пристінкових шарах

В пристінкових шарах обтікання геометрії машини було виконано згущення елементів сітки з визначенням величини першого елемента для k -ε моделі, щоб безрозмірний коефіцієнт Y^+ знаходився в межах від 30 до 100. Згущення елементів виконувалося за допомогою функції inflation з перехідним коефіцієнтом 1,2(рисунок 4.6).

Алгоритм Patch Conforming використовується для створення сітки, яка точно відповідає контурами та поверхням моделі. Цей метод є оптимальним для складних геометрій, де важливо враховувати дрібні деталі, які можуть сильно впливати на точність моделювання. Алгоритм дозволяє зберігати високу якість сітки, особливо в тих областях, де геометрія має вигини або різкі переходи.

Якість створеної сітки оцінюється за кількома критеріями, які визначають точність та стабільність числового розв'язку. Основні критерії якості сітки для методів кінцевих об'ємів включають:

1. Ортогональність сітки: Важливо, щоб елементи сітки були орієнтовані таким чином, щоб їхні осі були перпендикулярними до меж кожного елемента. Це дозволяє зменшити числові помилки, що виникають при обчисленні потоків через межі елементів.

2. Співвідношення сторін: Це відношення найбільшої та найменшої сторін елемента. Ідеально, якщо співвідношення сторін є близьким до одиниці, оскільки це забезпечує рівномірний розподіл обчислювальних ресурсів і точність результатів.

3. Коефіцієнт розширення: Цей критерій визначає, наскільки швидко елементи сітки змінюють свої розміри від однієї області до іншої. Якщо коефіцієнт розширення занадто великий, сітка може бути дуже нерівномірною, що призводить до погіршення точності розв'язку.

Забезпечення високої якості сітки є важливим етапом у створенні моделі для числового аналізу, оскільки це безпосередньо впливає на точність і швидкість конвергенції моделювання.

1.3 Задання граничних умов

Метою моделювання є визначення найбільш ефективних комбінацій факторів, що сприяють утворенню та утриманню димової хмари в повітрі, зокрема за критеріями тривалості розсіювання та площі її поширення. Це дозволяє оптимізувати умови для маскування транспортних засобів або інших об'єктів, що потребують приховання в умовах зовнішніх факторів. Для цього необхідно здійснити збір результатів модельного експерименту, які будуть занесені до таблиці плану експерименту, де будуть зафіксовані параметри, що впливають на формування та розсіювання димової хмари, такі як хімічний склад димової шашки, швидкість вітру, температура навколишнього середовища, а також технічні характеристики транспортного засобу.

На основі розгляду того, як різні фази впливають одна на одну, а також типу та моделі межі між цими фазами, у Fluent існують різні варіанти моделювання.

Моделювання методом «об'єм рідини (VOF)» - цей метод використовується для моделювання двох або більше рідин, що не змішуються, з різними поверхнями розділу. У цій моделі межа між фазами повністю змодельована, чітко визначена та чітка. Радіус кривизни межі між фазами повинен бути набагато більше розміру сітки. Моделювання, пов'язане з потоками на вільній поверхні та динамікою крапель при вприскуванні палива, як правило, проводиться за допомогою цього методу.

Метод «суміш» у деяких задачах немає необхідності точно моделювати межу між двома фазами. У цьому методі межа між фазами вважається однорідною сумішшю, що знижує точність межі між фазами та знижує обчислювальні витрати. Якщо ввімкнено параметр швидкості ковзання, швидкість двох фаз може бути різною на межі розділу. Цей метод моделювання використовується в таких проектах, як потоки частинок, бульбашкові потоки, транспортування суспензії та динаміка аерозолів. Модель суміші дозволяє фазам взаємопроникати.

Метод «*мокрый потік*» - цей метод спеціально фокусується на русі крапель рідини в домені газової фази, наприклад у паровій турбіні, де також відбувається зміна фази. Ця складна термодинамічна модель конденсації пари включає процеси зародження, росту крапель і випаровування. Модель вологої пари дозволяє інженерам аналізувати та оптимізувати конструкції парових турбін, надаючи детальну інформацію про розподіл крапель за розміром, частку вологи та локальну швидкість конденсації по всій області потоку.

Метод «*Ейлерів*». Усі три згадані раніше методи були однорідними моделями. передбачалося, що всі фази мають однакове поле швидкості та температури. Це означає відсутність ковзання між фазами. У випадках, коли висунуте припущення є неточним, використовується неоднорідна модель, яка забезпечується методом вільного Ейлера. У цьому методі між фазами існує швидкість ковзання, тобто фази мають різні швидкості одна відносно одної. Така дискретність значень параметрів між фазами призводить до збільшення обчислювальних витрат, але підвищує точність. Цей метод підходить для багатофазної задачі, в якій фази багато взаємодіють і водночас є повністю розділеними, наприклад, для киплячих шарів.

І останній метод в розглядуваній програмі це «*модель дискретної фази (DPM)*». Якщо частинки або краплі рухаються в рідині, і фокус зосереджений на шляху їх руху, цей метод моделювання підходить. У цьому методі рівняння ($F = ma$) розв'язується для частинок або крапель, а рівняння Нав'є-Стокса розв'язується для потоку рідини. Ви можете розглянути лише вплив рідини на частинки в симуляції або, збільшивши витрати на обчислення, розглянути вплив частинок на потік рідини та вплив частинок одна на одну. DPM особливо корисний у таких застосуваннях, як сушіння розпиленням, спалювання, потоки, навантажені частинками, і дисперсія забруднюючих речовин.

При розрахунку різних багатофазових проблем можна моделювати різними методами. Вибір правильності моделі, залежить від великої кількості факторів, зокрема від правильного вибору методу, досвіду розрахунку подібних задач та точності результатів, які потрібні в результаті.

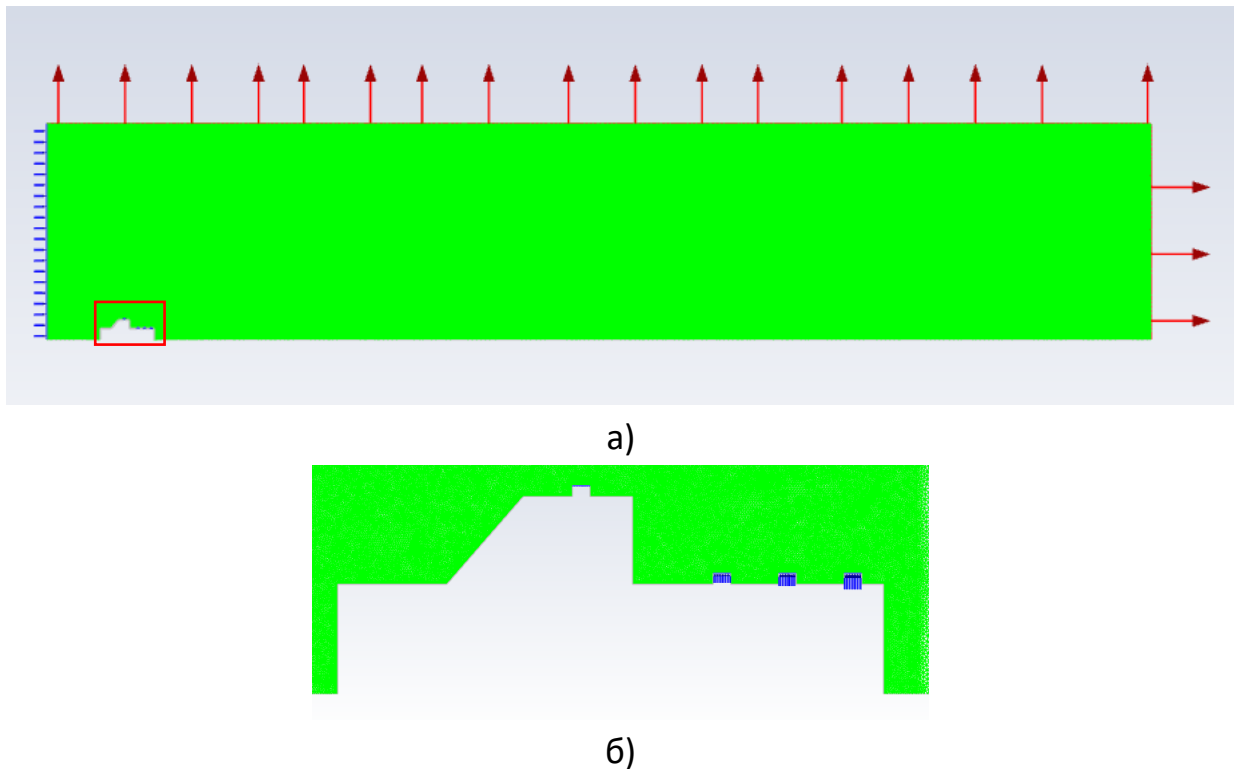


Рисунок 4.7 Задання граничних умов: а) – задання граничних умов до домену повітря; б) задання умов до димових шашок

В якості граничних умов для об'ємної багатофазної моделі задавався зовнішній вплив повітря з різними значеннями вологості (тобто двох фазний потік), який на рисунку 4.7 а) відображено синім кольором з лівого боку, де змінювалося значення швидкості потоку та температури повітря. Верхня та права площини розрахункової області задавалися як виходи з тиском 0 атм. На рисунку 4.7 б) відображена модель досліджуваного автомобіля з встановленими на ньому димовими шашками. Геометрія шашок складала 9 штук, але при необхідності граничні умови виходів з шашок задавалися як стінки, решта геометрії була задана як стінки, а перпендикулярні стінки до поверхні були задані симетрією. З шашок подався дим, що складається з трьох компонентів, визначених попередньо, зокрема: карбон-діоксид, азот та пари води у відповідних консистенціях при температурі 150°C та визначених з експерименту швидкостях потоку в перерізі труби [8].

Під час моделювання застосовувалася багатофазна модель об'єму рідини (Volume of Fluid, VOF), яка враховувала рівняння енергії та використовувала стандартну модель турбулентності $k-\epsilon$. Для забезпечення точності розрахунків було застосовано алгоритм зв'язування тиску та швидкості SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent), що дозволяє ефективно вирішувати задачі з сильними взаємозв'язками між тиском і швидкістю.

Розрахунки виконувалися у перехідному (транзієнтному) режимі з урахуванням впливу земного тяжіння, що забезпечувало адекватне моделювання поведінки багатофазного потоку. Для початкових умов використовувалася стандартна ініціалізація, характерна для задач, залежних від часу.

4.4 Методика планування числового експерименту

Матриця плану експерименту була сформована за методикою Тагучі[13]. Під час планування експерименту температура навколишнього середовища вважалася сталою, а атмосферний тиск використовувався як сигнальний фактор на двох рівнях (вищому та нижчому). У матриці планування фактори позначені наступними скороченнями:

А. Швидкість А (км/год) – швидкість переміщення потоку потоку повітря навколо автотранспорту з димовою шашкою.

В. Шашки (шт.) – кількість шашок, що працюють одночасно.

Загалом, ймовірно, що на кількість диму впливає схема включення шашок. Наприклад, характер розповсюдження димової завіси може залежати від того, чи димлять три шашки на кабіні чи три шашки з бортів. Можна запропонувати мінімум чотири варіанти схем включення шашок, але в цьому плані така можливість не була реалізована. Для цього плану під кількістю шашок мається на увазі наступні схеми їх роботи (позначені чорним, рисунок 4.8).

Швидкість вітру (км/год) була представлена як середнє значення для чотирьох умовних діапазонів, відповідно до балів шкали Бофорта. Перший рівень фактора, що відповідає шкалі 0, був визначений випадковим чином і

становив 0-0,5 км/год. Другий рівень відображає середнє значення для тихого та легкого вітрів, що складає 6 км/год. Третій рівень відповідає середньому

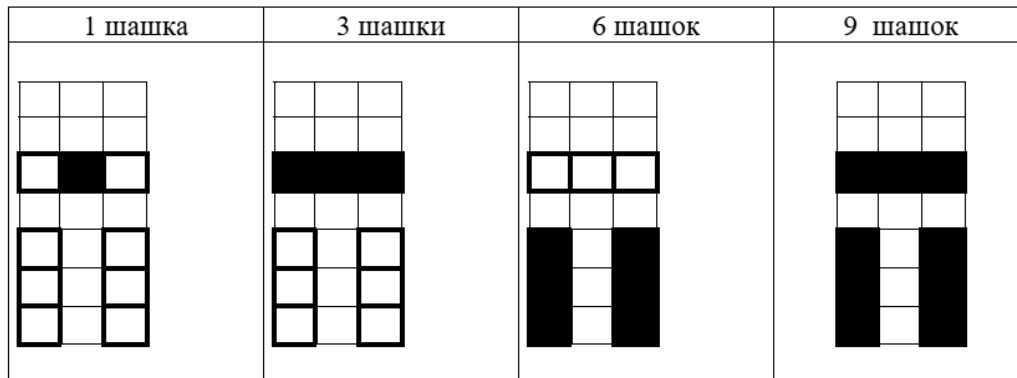


Рисунок 4.8 Схеми включення шапок

значенню для діапазону слабкий-помірний, що становить 20 км/год. Четвертий рівень характеризує середнє значення для свіжого вітру – 35 км/год. Вищі швидкості вітру не були розглянуті, оскільки їх використання для формування димової завіси вважалося недоцільним.

Абсолютна вологість повітря (г/м³) була призначена для відповідних температур, з урахуванням відносних рівнів вологості, таких як 20%, 50%, 80% і 100%. Точніше визначити рівні вологості можна було б при більш детальному вивченні погодних умов для кожної пори року та частоти виникнення тих чи інших значень вологості.

Напрямок вітру (В) відносно руху автотранспорту враховував чотири з восьми можливих напрямків. Зокрема, це зустрічний вітер (ZV), попутний вітер (PV), боковий правий вітер (BVP) та боковий лівий вітер (BVL).

4.5 Результати розрахунків

Результати моделювання показали, що використана багатофазна модель об'єму рідини (VOF), з врахуванням рівняння енергії та стандартної моделі турбулентності k-ε, дозволяє ефективно описувати поведінку димового потоку

в умовах, наближених до реальних. Було отримано дані про динаміку поширення димової хмари, її температурний розподіл, а також швидкість і об'єм димового потоку за різних умов. Зокрема, проведено 63 числових розрахунки при різних швидкостях вітру, які змінювалися в діапазоні від 0,5 км/год до 20 км/год. Крім того, варіювалися граничні умови вологості повітря в межах від 20% до 100%. Ще одним змінним фактором була температура навколишнього середовища, яка змінювалася від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ із кроком в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результаті були отримані розподіл фаз в середовищі рисунок 4.9 та розподіл температури та густини.

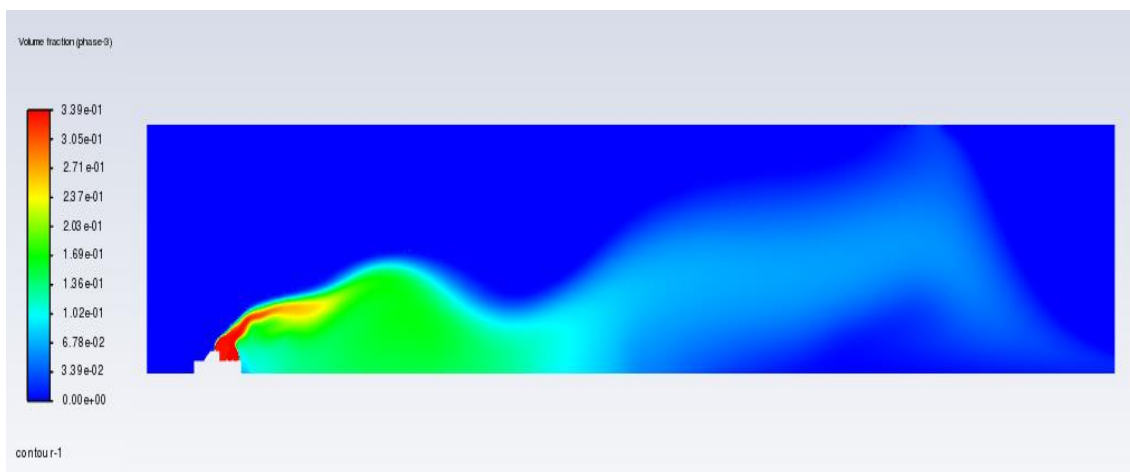


Рисунок 4.9 Об'ємна частка потоку диму в середовищі

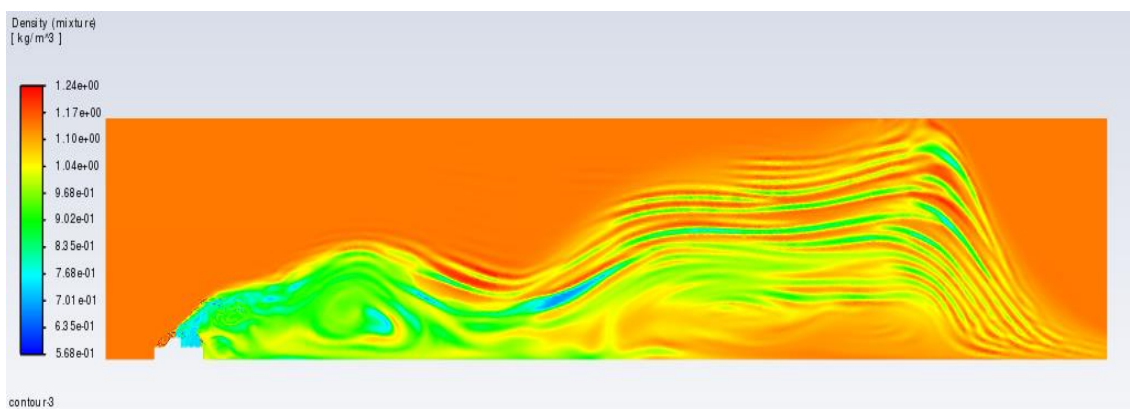


Рисунок 4.10 Розподіл густини в багатофазовому середовищі

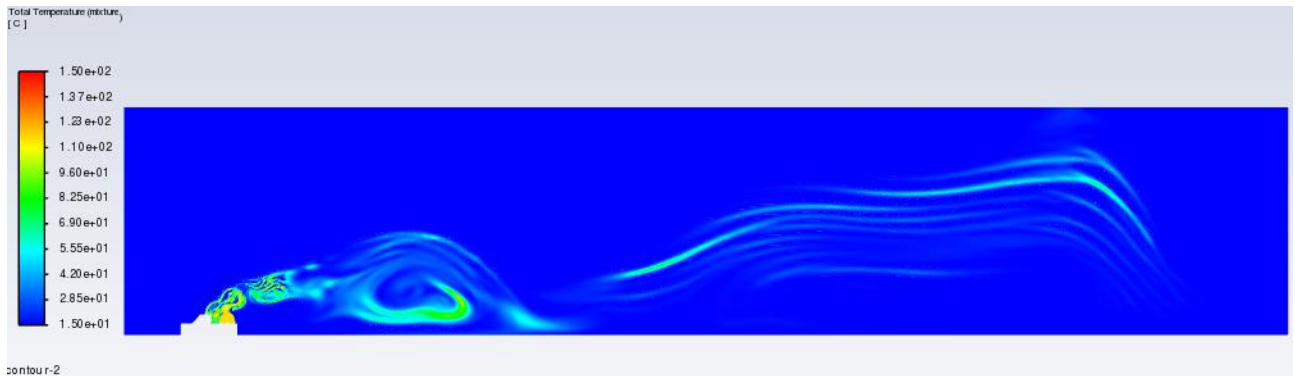


Рисунок 4.11 Розподіл температури в багатофазовому середовищі

Отримані дані підлягають обробці за допомогою статистичних методів, що дозволяють виявити взаємозв'язки між різними параметрами та результатами моделювання, а також визначити найбільш значущі фактори, що впливають на час утримання димової хмари в повітрі та площу її розповсюдження. Моделювання також дозволяє оцінити, як різні погодні умови, такі як вітрові навантаження, температура та вологість впливають на площу розповсюдження димової хмари та її ефективність у маскуванні.

4.6 Обробка результатів

Програма для визначення кількості диму у площині виконує аналіз зображення, розрахунки площі димової завіси та кольорових компонентів. Спочатку завантажуються кольорове зображення у форматі RGB, яке перетворюється у градації сірого для аналізу інтенсивності пікселів. Далі визначаються фізичні розміри області, яку представляє зображення: ширина 102 м і висота 20 м. На основі цих параметрів обчислюється масштаб між пікселями та реальними одиницями, а також площа одного пікселя у квадратних метрах.

Для виділення областей із різною щільністю диму застосовується мультипорогова обробка. Задаються пороги інтенсивності, за якими створюються логічні маски. Ці маски об'єднуються у загальну комбіновану маску, що охоплює всі області, інтенсивність яких перевищує задані пороги.

Потім маска згладжується середнім фільтром для зменшення шуму та вирівнює межі. Кількість пікселів у згладженій масці використовується для розрахунку площі димової завіси у квадратних метрах, що дозволяє оцінити її розмір. Додатково виконується аналіз кольорів: зображення розділяється на червоний, зелений і синій канали, для яких задаються пороги інтенсивності. Це дозволяє виділити області диму різних кольорів і розрахувати їх площу.

Отримані результати виводяться у вигляді числових значень площі димової завіси та кольорових компонентів. Для візуалізації згладжена маска конвертується у формат, придатний для відображення, і демонструється на екрані із заголовком, що ілюструє виділені області диму. В результаті були отримані значення площ заповнення диму в середньому перерізі площини досліджуваної установки в залежності від різних факторів таблиці 4.1-4.7.

Таблиця 4.1 Результати числових розрахунків при $t=-20^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість | Вологість | Атмосферний тиск | Площа, м2 |
|-------------|-----------|-----------|------------------|-----------|
| 1 | 0,5 | 0,54 | 98,7834 | 5,29 |
| 1 | 6 | 0,86 | 100,45 | 58,24 |
| 1 | 20 | 1,08 | 100,1167 | 10,51 |
| 3 | 0,5 | 0,86 | 100,1167 | 25,41 |
| 3 | 6 | 1,08 | 98,7834 | 366,01 |
| 3 | 20 | 0,54 | 100,45 | 132,11 |
| 9 | 0,5 | 1,08 | 100,45 | 44,8 |
| 9 | 6 | 0,54 | 100,1167 | 695,13 |
| 9 | 20 | 0,86 | 98,7834 | 307,75 |

Таблиця 4.2 Результати числових розрахунків при $t=-10^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість вітру | Вологість | Атм. тиск | Площа, м2 |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,5 | 0,71 | 98,8541 | 2,28 |
| 1 | 6 | 1,42 | 99,5207 | 57,41 |
| 1 | 20 | 1,89 | 100,1873 | 12,23 |
| 3 | 0,5 | 1,42 | 100,1873 | 28,98 |
| 3 | 6 | 1,89 | 98,8541 | 300,85 |
| 3 | 20 | 0,71 | 99,5207 | 137,41 |
| 9 | 0,5 | 1,89 | 99,5207 | 45,99 |
| 9 | 6 | 0,71 | 100,1873 | 700,05 |
| 9 | 20 | 1,42 | 98,8541 | 293,85 |

Таблиця 4.3 Результати числових розрахунків при $t=0^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість вітру | Вологість | Атм. тиск | Площа, м ² |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 0,5 | 1,45 | 98,921 | 4,07 |
| 1 | 6 | 2,91 | 99,588 | 65,52 |
| 1 | 20 | 3,88 | 100,254 | 14,23 |
| 3 | 0,5 | 2,91 | 100,254 | 35,4 |
| 3 | 6 | 3,88 | 98,921 | 315,77 |
| 3 | 20 | 1,45 | 99,588 | 144,54 |
| 9 | 0,5 | 3,88 | 99,588 | 54,68 |
| 9 | 6 | 1,45 | 100,254 | 714,12 |
| 9 | 20 | 2,91 | 98,921 | 340,23 |

Таблиця 4.4 Результати числових розрахунків при $t=10^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість вітру | Вологість | Атм. тиск | Площа, м ² |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 0,5 | 2,81 | 98,982 | 6,88 |
| 1 | 6 | 5,63 | 99,649 | 82,57 |
| 1 | 20 | 7,51 | 100,316 | 24,08 |
| 3 | 0,5 | 5,63 | 100,316 | 29,67 |
| 3 | 6 | 7,51 | 98,982 | 377,61 |
| 3 | 20 | 2,81 | 99,649 | 177,15 |
| 9 | 0,5 | 7,51 | 99,649 | 60,65 |
| 9 | 6 | 2,81 | 100,316 | 803 |
| 9 | 20 | 5,63 | 98,982 | 363,67 |

Таблиця 4.5 Результати числових розрахунків при $t=20^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Ш-сть вітру | Вологість | Атм. тиск | Площа, м ² |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 0,5 | 5,17 | 99,039 | 8,83 |
| 1 | 6 | 10,35 | 99,706 | 100,93 |
| 1 | 20 | 13,79 | 100,373 | 26,19 |
| 3 | 0,5 | 10,35 | 100,373 | 49,54 |
| 3 | 6 | 13,79 | 99,039 | 432,22 |
| 3 | 20 | 5,17 | 99,706 | 190,1 |
| 9 | 0,5 | 13,79 | 99,706 | 66,09 |
| 9 | 6 | 5,17 | 100,373 | 844,15 |
| 9 | 20 | 10,35 | 99,039 | 368,14 |

Таблиця 4.6 Результати числових розрахунків при $t=30^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість | Вологість | Атм. тиск | Площа, м ² |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 0,5 | 9,08 | 99,093 | 12,9 |
| 1 | 6 | 18,16 | 99,759 | 124,8 |
| 1 | 20 | 24,21 | 100,426 | 32,27 |
| 3 | 0,5 | 18,16 | 100,426 | 58,84 |
| 3 | 6 | 24,21 | 99,093 | 437,63 |
| 3 | 20 | 9,08 | 99,759 | 208,3 |
| 9 | 0,5 | 24,21 | 99,759 | 72,78 |
| 9 | 6 | 9,08 | 100,426 | 835,17 |
| 9 | 20 | 18,16 | 99,093 | 385,17 |

Таблиця 4.7 Результати числових розрахунків при $t=40^{\circ}\text{C}$

| К-сть шашок | Швидкість | Вологість | Атм. тиск | Площа, м ² |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| 1 | 0,5 | 15,29 | 99,142 | 17,98 |
| 1 | 6 | 30,59 | 99,809 | 139,91 |
| 1 | 20 | 40,79 | 100,476 | 35,32 |
| 3 | 0,5 | 30,59 | 100,476 | 54,63 |
| 3 | 6 | 40,79 | 99,142 | 484,61 |
| 3 | 20 | 15,29 | 99,809 | 227,1 |
| 9 | 0,5 | 40,79 | 99,809 | 74,72 |
| 9 | 6 | 15,29 | 100,476 | 846,87 |
| 9 | 20 | 30,59 | 99,142 | 405,35 |

Числовий експеримент проводився при значеннях температури -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 40°C . Кількість димових шашок становила 1, 3 та 9 одиниць відповідно до методики планування експерименту, а швидкість вітру варіювалася між 0,5 км/год, 6 км/год та 20 км/год. Вологість повітря змінювалася залежно від температури у діапазоні від 0,54 до 24,21 г/м³, а атмосферний тиск перебував у межах 98,7834–100,426 кПа.

В результаті моделювання було отримано: при температурі -20°C максимальна площа для 1 шашки становила 58,24 м² при швидкості вітру 6 км/год, для 3 шашок – 366,01 м² при швидкості 6 км/год та вологості 1,08 г/м³, а для 9 шашок – 695,13 м² при тій самій швидкості. При температурі -10°C для 1

шашки площа досягала 57,41 м² при швидкості 6 км/год, для 3 шашок – 300,85 м², а для 9 шашок – 700,05 м². За температури 0°C максимальна площа для 1 шашки становила 65,52 м² при швидкості 6 км/год, для 3 шашок – 315,77 м², а для 9 шашок – 714,12 м². При 10°C площа для 1 шашки досягала 82,57 м² при швидкості 6 км/год, для 3 шашок – 377,61 м², а для 9 шашок – 803 м². За температури 20°C для 1 шашки площа становила 100,93 м² при швидкості 6 км/год, для 3 шашок – 432,22 м², а для 9 шашок – 844,15 м². При температурі 40°C максимальна площа для 1 шашки становила 124,8 м² при швидкості 6 км/год, для 3 шашок – 437,63 м², а для 9 шашок – 835,17 м².

4.7 Висновки

В результаті зі зростанням температури від -20°C до 40°C спостерігається збільшення площі розповсюдження димової завіси, що пов'язано зі зменшенням густини повітря та кращим поширенням диму. Максимальна площа досягається при швидкості вітру 6 км/год, оскільки при 0,5 км/год площа зменшується через недостатнє переміщення димової хмари, а при 20 км/год відбувається надмірне розсіювання. Збільшення кількості шашок до 9 значно підвищує площу димової завіси завдяки збільшенню обсягу диму. Вища вологість сприяє утриманню диму у повітрі, проте при надмірно високих значеннях площа може зменшуватись через конденсацію. Вплив атмосферного тиску є менш значним, однак спостерігається тенденція до збільшення площі при вищих значеннях тиску.

Результати моделювання показали, що оптимальними умовами для утворення максимальної площі димової завіси є температура повітря 10-20°C, швидкість вітру 6 км/год, кількість шашок 9 та вологість повітря у межах 2,81–5,63 г/м³. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації параметрів димових завіс у реальних умовах.

ВИСНОВКИ

Використання сучасних програмних комплексів для обчислювальної гідродинаміки (CFD) при моделюванні поведінки диму за різних граничних умов являється важливим у наш час. CFD-моделювання дозволяє прогнозувати розподіл температур, швидкість поширення диму та інші критичні параметри, що є ключовими для прогнозування його поведінки, контролю або підбору оптимальної кількості димових шашок для успішного виконання завдань. Конфігурація джерел диму та їх розташування суттєво впливають на динаміку димових потоків, а явище множинності рішень підкреслює необхідність ретельного аналізу для передбачення різних сценаріїв поширення диму. У рамках дослідження було розроблено програмно-апаратний комплекс для автоматичного вимірювання швидкості, витрати та температури димового потоку, що базується на вимогах ДСТУ 8725:2017. Під час експериментів було виявлено, що використання дифманометра з трубкою Піто є неефективним через вплив нагару на чутливі елементи приладу. Натомість застосування датчиків частоти обертання крильчатки та термопар хромель-алюмель дозволило отримати достовірні дані про параметри димового потоку протягом усього періоду горіння шашки. Валідація експериментальних результатів за допомогою числових досліджень підтвердила коректність обраної методики та можливість її використання для подальших досліджень. Результати моделювання показали, що оптимальними умовами для утворення максимальної площі димової завіси є температура повітря 10-20°C, швидкість вітру 6 км/год, кількість шашок 9 та вологість повітря у межах 2,81–5,63 г/м³. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації параметрів димових завіс у реальних умовах, що забезпечує ефективний контроль та керування системами димового захисту за різних погодних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гутченко О. А. Розвиток засобів маскування дій військ та об'єктів із застосуванням аерозолів / О. А. Гутченко, К. С. Гутченко, І. М. Тіхонов, П. В. Ушмаров // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. - 2014. - № 3. - С. 154-157.
2. В.В. Щербань, О.В. Князь, Є.О. Пономарьов Напрямки досліджень щодо розробки аерозольної піротехнічної суміші для використання у маскувальних боєприпасах. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Шостка, 14-16 листопада 2018 року).*
3. Ronald L. Petersen *Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height* June. 2015 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition At: Raleigh, NC
4. Маскування військ та об'єктів. Захист від високоточної зброї : навч. посіб. / В. В. Пугач, В. П. Чепурний, Куртов А.І. та ін. Харків: ВЮІ НЮУ ім. Ярослава Мудрого, 2022. 116 с.
5. Танцюра , І. ., Клімов , О., Стаховський , О. ., & Гузенко , С. (2024). Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскування, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн - партнерів. *Військово-технічний збірник*, (30), 8–13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>
6. Gabriele Vigne, Wojciech Węgrzyński, Alexis Cantizano, Pablo Ayala, Guillermo Rein, Cándido Gutiérrez-Montes, Experimental and computational study of smoke dynamics from multiple fire sources inside a large-volume building. *Building Simulation* 2020, [<https://doi.org/10.1007/s12273-020-0715-1>]
7. Guo A., Gao X., Li T., Dai J., Li X. Five-frame Difference Method for Extracting Characteristic Parameters from Measured Infrared Smoke Screen Images. Hanneng Cailiao. *Chinese Journal of Energetic Materials*. 2021. 29(12). P. 1144-1151. doi: 10.11943/CJEM2021075.
8. Довгополов, А. ., Колесник , В. ., Ланчинський , В. ., Кириленко , М. ., & Ярош , В. . (2024). Розробка дослідного стенду для автоматичного визначення швидкості руху, витрати та температури димового потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, (3(21), 25–31. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.04>

9. Gong J, Li Y. CFD modelling of the effect of fire source geometry and location on smoke flow multiplicity. *Building Simulation*, 2010, 3(3): 205-214. <https://doi.org/10.1007/s12273-010-0004-5>
10. Zhou H., Cong H., Wang Y., Dou Z. A computer-vision based deep learning model of smoke diffusion. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. 187. P. 721–735. doi: 10.1016/j.psep.2024.04.123.
11. Ramon Papa, Marcelo Pustelnik, Luis C. de C. Santos A CFD Model for Cargo Compartment Smoke Detection. Paper No: IMECE2005-81287, pp. 663-671; <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81287>
12. ДСТУ 8725:2017 Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та об'ємної витрати газопилових потоків
13. N. Celik, E. Turgut, Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method, *Energy Convers. Manag* 53, 2012

Додаток А

Код програми для розпізнавання маски димової завіси

```
% Завантаження кольорового зображення
img_rgb = imread('D:\9+20.jpg');

% Перетворення зображення в градації сірого
img_gray = rgb2gray(img_rgb);

% Параметри домену
real_width_m = 102; % Довжина домену, метри
real_height_m = 20; % Висота домену, метри

% Отримання розмірів зображення
[img_height, img_width] = size(img_gray);

% Масштаб для перетворення пікселів у метри
scale_x = real_width_m / img_width;
scale_y = real_height_m / img_height;
area_per_pixel_m2 = scale_x * scale_y;

% Визначення порогів для мультипорогової обробки
thresholds = [40, 70, 100];
combined_mask = false(size(img_gray)); % Ініціалізація логічної маски

% Генерація та об'єднання масок для кожного порогу
for t = thresholds
    mask = img_gray >= t;
    combined_mask = combined_mask | mask;
end

% Просте згладжування маски за допомогою фільтра
kernel = ones(3, 3) / 9; % Середній фільтр 3x3
smoothed_mask = conv2(double(combined_mask), kernel, 'same') > 0.5;
```

```

% Конвертуємо маску в формат uint8 для відображення
combined_mask_display = uint8(smoothed_mask) * 255;

% Підрахунок кількості пікселів у масці димової завіси
num_pixels = sum(smoothed_mask(:));

% Розрахунок площі димової завіси в квадратних метрах
plume_area_m2 = num_pixels * area_per_pixel_m2;

fprintf('Площа димової завіси: %.2f квадратних метрів\n', plume_area_m2);

% Додатковий розрахунок площі для кожного кольорового каналу
% Виділення кольорових каналів
red_channel = img_rgb(:,:,1);
green_channel = img_rgb(:,:,2);
blue_channel = img_rgb(:,:,3);

% Визначення порогів для кольорових спектрів
red_thresholds = [130, 180]; % Інтенсивність для червоного кольору
green_thresholds = [60, 130]; % Інтенсивність для зеленого кольору
blue_thresholds = [50, 110]; % Інтенсивність для синього кольору

% Створення масок для кожного кольору
red_mask = (red_channel >= red_thresholds(1)) & (red_channel <=
red_thresholds(2));
green_mask = (green_channel >= green_thresholds(1)) & (green_channel <=
green_thresholds(2));
blue_mask = (blue_channel >= blue_thresholds(1)) & (blue_channel <=
blue_thresholds(2));

% Підрахунок площі для кожного кольору
num_pixels_red = sum(red_mask(:));
area_red_m2 = num_pixels_red * area_per_pixel_m2;

num_pixels_green = sum(green_mask(:));
area_green_m2 = num_pixels_green * area_per_pixel_m2;

```



```
num_pixels_blue = sum(blue_mask(:));  
area_blue_m2 = num_pixels_blue * area_per_pixel_m2;
```

```
% Виведення площ для кожного кольору  
fprintf('Площа червоного диму: %.2f квадратних метрів\n', area_red_m2);  
fprintf('Площа зеленого диму: %.2f квадратних метрів\n', area_green_m2);  
fprintf('Площа синього диму: %.2f квадратних метрів\n', area_blue_m2);
```

```
% Відображення результату  
imshow(combined_mask_display);  
title('Маска димової завіси після згладжування');
```