

## Комп'ютерне моделювання обтікання тіл в'язкою рідиною

Т. Ж. НАДРИГАЙЛО, О. С. ТІТАРЕНКО

Дніпродзержинський державний технічний університет

У даній роботі побудовано математична модель обтікання тіл в'язкою рідиною, розроблено програмний комплекс моделювання гідродинамічних процесів і візуалізації результатів розрахунків, надано опис інтерфейсу користувача. Проведені чисельні розрахунки задач обтікання рідиною твердих тіл різних форм. Зроблено порівняльний аналіз з системою моделювання руху рідини та газу FlowFision.

В данной работе построена математическая модель обтекания тел вязкой жидкостью, разработан программный комплекс моделирования гидродинамических процессов и визуализации результатов расчетов, дано описание интерфейса пользователя. Проведены численные расчеты задач обтекания жидкостью твердых тел разных форм. Выполнен сравнительный анализ с системой моделирования движения жидкости и газа FlowFision.

In this paper mathematical model of flow past solids by viscous liquid was built, software package for modeling of hydrodynamic processes and visualization of the calculation results was developed, description of user's interface was given. Numerical computations of problems of flow past solid bodies of different shapes by the liquid were held. Comparative analysis with system FlowVision, which models liquid and gas motion, was performed.

**Вступ.** В останні роки зі збільшенням потужності ЕОМ все більшу роль відіграють різноманітні чисельні методи для комп'ютерного моделювання, оскільки вони мають ряд переваг: їх легко алгоритмізувати, а звідси неважкі в програмуванні і більш універсальні на відміну від аналітичних методів, покривають більший круг задач.

В зв'язку з цим розроблено багато програмних комплексів для розв'язку гідродинамічних та теплофізичних задач. Найбільш відомими прикладами програм такого типу є ANSYSFluent, FlowVision, OpenFOAM, SolidWorks та ін. Але в них є ряд недоліків: вони дуже багато коштують, займають багато місця на комп'ютері, потребують інсталяції. Тому виникла необхідність у створенні програмного комплексу, хоч і з меншими функціональними можливостями, але з усунутими недоліками.

Для опису руху рідини, як правило, використовуються рівняння Нав'є-Стокса. За допомогою цього рівняння можливо моделювати турбулентні потоки, включаючи так звану вихрову доріжку Кармана [1], вивчення властивостей якої може відігравати велику роль при проектуванні інженерами різноманітних пристроїв, споруд, тощо [2].

Ціллю даної роботи є побудова математичної моделі обтікання твердих тіл різної форми в'язкою рідиною з урахуванням турбулентних ефектів (доріжки Кармана), які моделюються за допомогою трьохпараметричної алгебраїчної моделлю турбулентності, та розробка програмного комплексу для моделювання гідродинамічних задач, який займає небагато місця, не потребує інсталяції, безкоштовний.

**Постановка задачі.** Розглянемо найпростіший варіант задачі обтікання тіла в'язкою рідиною. У прямокутну область розмірами  $R \times H$  втікає рідина з деякою початковою швидкістю  $V_0$ . На деякій відстані від вхідного потоку розташований циліндр з діаметром  $d$ . На іншому кінці потік вільно витікає, таким чином наша область є умовно безкінечною в одному напрямку. Геометрія задачі зображена на рис. 1.

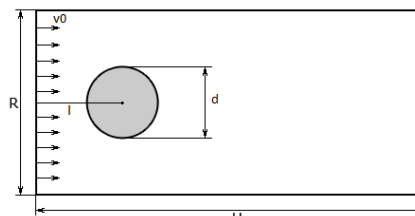


Рис. 1. Геометрія задачі обтікання тіла рідиною

Необхідно: побудувати математичну модель обтікання циліндричного тіла в'язкою рідиною з використанням трипараметричної моделі турбулентності; виконати чисельні розрахунки задачі обтікання тіл різної форми та візуалізувати результати розрахунку (швидкості, модулі швидкостей та поле тиску); провести аналіз отриманих результатів.

Гідродинаміку процесу описують рівняння Нав'є-Стокса. Для чисельного розв'язку рівнянь використовуємо трьохетапну схему розщеплення за фізичними факторами [3]. Турбулентний характер руху рідини враховуємо трьохпараметричної алгебраїчної моделлю для ефективного коефіцієнта кінематичної в'язкості [4]:

$$v' = v + \frac{\Delta}{Re_{\Delta}} v_{\Delta} + l^2 \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|,$$

де  $v$  – динамічна в'язкість,  $Re_{\Delta} = 2$  – сіткове число Рейнольдса,  $l$  – довжина змішування — параметри моделі;  $\Delta$  – розмір розрахункової комірки,  $v_{\Delta}$  – швидкість в межах комірки,  $y$  – змінна, яка параметризує вісь перпендикулярно напрямку потоку.

Задачу розв'язуємо в декартових координатах. За розрахункову область беремо осьовий переріз області – таким чином задача ефективно зводиться до двомірної. Розрахункова область являє собою прямокутник. Розбиваємо розрахункову область рівномірною шаховою сіткою на елементарні комірки. Для зручності розстановки початкових та граничних умов облямовуємо шаром з заграничних комірок. Рівномірна шахова сітка характерна тим, що на ній скалярні величини розраховуються в центрі комірок, а векторні – на гранях комірок.

Мат. мод. № 2 (27), 2012

рок (рис. 2).

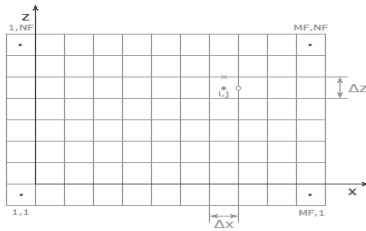


Рис. 2. Розрахункова область задачі

На обраній шаховій сітці апроксимуємо рівняння моделі та граничні умови.

Моделювання процесу руху рідини при обтіканні тіл різної форми дали такі чисельні результати.

На рисунку 3 за допомогою стрілочок показані швидкості на початковому етапі обтікання тіла циліндричної форми. Зразу за тілом починають формуватися два вихори. Вони виникають внаслідок того, що за тілом знаходиться зона пониженого тиску. У зв'язку з цим верхні шари діють на нижні, що призводить до переміщення шарів рідини. У початковий момент розрахунку спостерігається симетричне зміщення, що і видно на рис. 3.

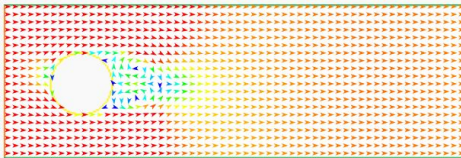


Рис. 3. Розподіл швидкостей у момент часу 1.4с

З плином часу, бачимо що вихори поступово стають несиметричними (рис.4) – з цього можна зробити висновок що процес плавно переходить із ламінарного в турбулентний, що характерно для нестационарного процесу. Це відбувається через те, що поле тиску за тілом становиться нерівномірним.

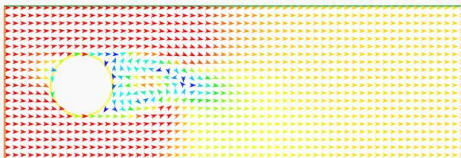


Рис. 4. Розподіл швидкостей в момент часу 2.2с

На рис. 5–6, ми спостерігаємо, що процес повністю переходить у турбулентний, це видно по відривних вихорах, що у два ряди йдуть слід за тілом, які вони обтікають, і характерно для турбулентного характеру руху рідини. На цих результатах вже явно видно сформовану вихрову доріжку Кармана.

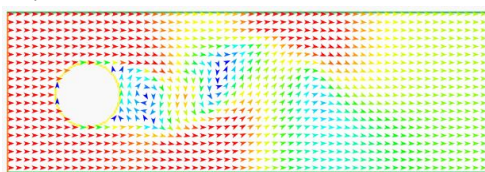


Рис. 5. Розподіл швидкостей у момент часу 5.2с

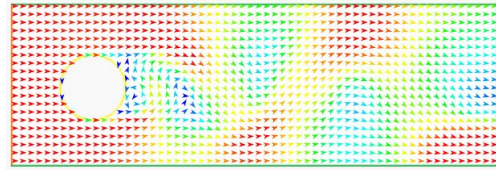


Рис. 6. Розподіл швидкостей у момент часу 10с

За допомогою градієнту кольорів (рис.7) зображено розподіл поля абсолютних значень швидкостей. На ньому наглядно видно періодичні відривні вихори, які йдуть слід за тілом, що свідчить про адекватність результатів моделі

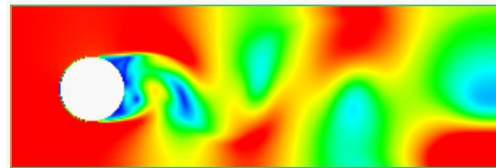


Рис. 7. Розподіл модулів швидкостей

За допомогою ізоліній (рис.8) зображено початковий розподіл поля тиску. Ізолінії мають симетричний характер і зосередженні з лівого боку тіла, яке вони обтікають, зі сторони вхідного потоку. З їх кольору видно, що це зона підвищеного тиску, оскільки вхідний потік напливає на круговий циліндр, який і формує цю зону. Далі, по мірі обтікання потоку, тиск зменшується.

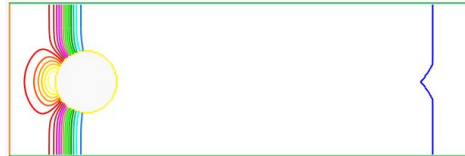


Рис. 8. Розподіл поля тиску в момент часу 0.1с

Розподіл поля тиску в інші проміжки часу зображено на рис. 9–11. Спостерігаємо схоже утворення ізоліній.

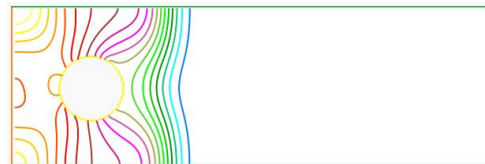


Рис. 9. Розподіл поля тиску в момент часу 0.2с



Рис. 10. Розподіл поля тиску в момент часу 0.9с

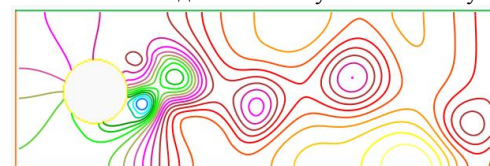


Рис. 11. Розподіл поля тиску в момент часу 10с

Далі наведенні приклади обтікання тіл різної геометрії, а також при різних вхідних параметрах.

Обтікання тіла при високій кінематичній в'язкості  $10^{-3}$  (рис. 12), не дає змогу рідині при обтіканні утворювати відривні вихори, адже, для цього не достатньо швидкості потоку, при такій конфігурації маємо невисоке число Рейнольдса, отже це є ще одним підтвердженням адекватності нашої математичної моделі.

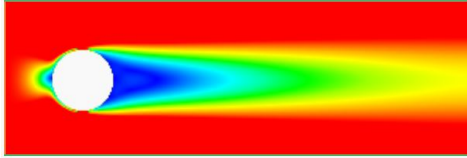


Рис. 12. Обтікання кругового циліндра при високій кінематичній в'язкості:  $\nu = 0.007$

Розглядаючи процес обтікання кругового циліндра, радіус якого невеликий (рис. 13), спостерігаємо доріжку Кармана, яка при цьому не має досить чітко виражених відривних вихорів.

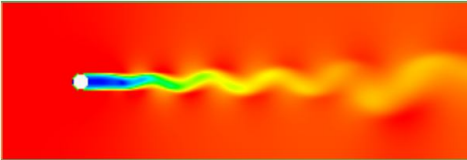


Рис. 13. Обтікання кругового циліндра з малим радіусом:  $\nu = 7 \cdot 10^{-7}$

Розглянемо процес обтікання двох послідовно розміщених кругових циліндрів (рис. 14). Як бачимо, після першого тіла утворюється слід, дуже схожий на попередні результати, після другого ж тіла, не має чітко вираженої доріжки Кармана, це можна пояснити тим, що перший циліндр «гальмує» швидкість, тим самим не даючи достатніх можливостей для утворення відривних вихорів після другого тіла обтікання.

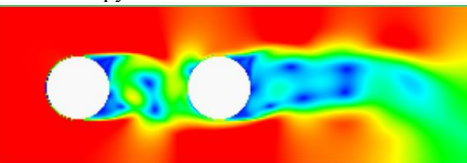


Рис. 14. Обтікання двох кругових циліндрів, які розташовані один за одним:  $\nu = 7 \cdot 10^{-7}$

На рис. 15 зображений процес обтікання кругового циліндра, при умові, що маємо зліва вхідний потік, з всіх інших сторін вихідний. Результати дещо відрізняються від тих, коли знизу і зверху була задана стінка, яка утримувала потік і спрямовувала його до протилежного кінця труби. У даному випадку потік ніщо не стримує, цим і пояснюються більш плавні і розряджені вихори.

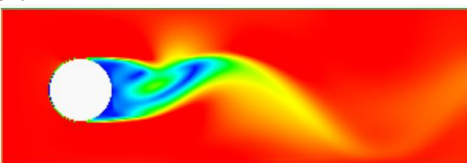


Рис. 15. Обтікання кругового циліндра при наявності вільно вихідного потоку з трьох сторін:  $\nu = 7 \cdot 10^{-7}$

Обтікання паралелепіпеда з квадратною осно-

вою, яке зображене на рисунку 16, має характер відривних вихорів, досить схожий з характером вихорів при обтіканні кругового циліндра.

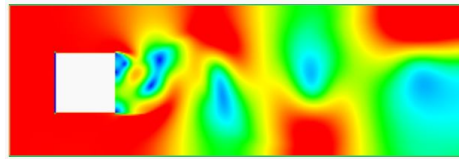


Рис. 16. Обтікання паралелепіпеда, з квадратною основою:  $\nu = 7 \cdot 10^{-7}$

**Опис інтерфейсу програми.** У даній роботі була створена система під назвою ContinuumMechanicsSimulation(CMS) комп'ютерного моделювання гідродинамічних і теплофізичних задач та багатофазних середовищ. Розробка виконувалась на мові програмування C# 4.0, платформі NET Framework 4.0 у середовищі MicrosoftVisualStudio 2010 з використанням графічної системи WPF. Мова інтерфейсу англійська. Виконуваний модуль складає 1.8 МБ.

Одразу після запуску програми відображається головне вікно, з якого можна розпочинати роботу в даній системі.

Вікно, з якого починається знайомство з програмою, логічно можна поділити на п'ять частин.

1. Головне меню програми. У ньому містяться всі головні опції, такі, як робота з задачею (створення, збереження і завантаження), доступ до налаштувань і т.і.
2. Панель інструментів. Містить у собі панелі управління обчисленнями, записом анімації, доступ до налаштувань моделі, а також управління задачею.
3. Панель вкладок. Це місце, де відбувається переключення між двома основними режимами програми: Visual (візуальне відображення результатів розрахунку), Data (числове відображення результатів розрахунку).
4. Бокова панель. Містить у собі дві закладки. Перша необхідна для завдання граничних умов для геометрії задачі. Друга слугує для налаштування візуальних шарів, які відображають процес обчислення.
5. Панель статусу. Призначена для виведення службової інформації, наприклад такої, як поточний розрахунковий час.

**Головне меню програми.** Призначене для доступу до головних опцій програми. Складається з 4-х пунктів:

1. Меню Файл (File)
2. Меню Вигляд (View)
3. Меню Інструменти (Tools)
4. Меню Довідка (Help)

Меню *Файл* – **File** містить такі пункти:

1. Меню *Новий* (**New** – комб. кл. Ctrl+N) – створює нову задачу, задаючи їй ім'я і тип моделі;
2. Меню *Відкрити* (**Open** – комб. кл. Ctrl+O) – відкриває збережену задачу, яка може містити в собі стан розрахунку;
3. Меню *Зберегти як* (**SaveAs**) – дозволяє зберегти задачу разом з геометрією та поточним розрахунковим станом;
4. Меню *Перейменувати* (**Rename**) – виклик діалогового вікна з перейменування поточної задачі;
5. Меню *Вихід* (**Exit** – комб. кл. Alt+F4) – завершує робочий сеанс програми CMS.

Меню *Вигляд* – **View** Містить пункт *Показ бокової па-*

нелі (**Showsidebar**) – скриває чи показує праву бокову панель з налаштуванням граничних умов і візуальними прошарками;

Меню *Інструменти* – **Tools** містить пункт *Уподобання* (**Preferences**) – відкриває діалогове вікно з уподобаннями користувача. У цьому вікні можливо, наприклад, вибрати час оновлення інформації на екрані, крок запису анімації і т.і.

Меню *Довідка* – **Help** містить пункт *Про Програму* (**About**) – відкриває вікно з короткою інформацією про дану обчислювальну систему.

**Панель інструментів.** Слугує помічником для виконання основних функцій програми. Умовно можна поділити на 4-ри підрозділи:

1. Панель роботи с задачами.
2. Панель управління ходом розрахунку.
3. Панель управління записом анімації.
4. Налаштування моделі.

Розглянемо кожен із пунктів окремо:

#### Панель роботи с задачами – (Problemspanel)

1. *Нова задача* (**NewProblem**) – створює нову задачу указуючи її назву та встановлюючи модель.
2. *Відкрити задачу* (**OpenProblem**) – відкрити збережену задачу.
3. *Зберегти задачу як* (**SaveProblemAs**) – зберегти поточну задачу та розрахунки.

#### Панель управління ходом розрахунку – (Calculationpanel)

1. *Ініціалізувати дані* (**Initialize data**) – ініціалізує вхідні дані початковими умовами, приводить задачу до початкового стану розрахунку (у початковий момент часу).
2. *Початок/пауза обчислення* (**Start/pausecalculate**) – запускає процес автоматичного обчислення, або призупиняє його на деякий час.
3. *Наступний крок* (**Nextstep**) – виконує наступний крок обчислень з шагом по часу  $dt$ .

#### Панель управління записом анімації (Animationrecordingpanel)

1. *Запис анімації* (**Record animation**) – починає процес запису .gif анімації в файл.
2. *Пауза запису анімації* (**Pauseanimationrecording**) – призупиняє або відновлює процес запису анімації.
3. (**Stopanimationrecordingandsavetofile**) – зупиняє процес запису анімації та зберігає його в файл з ім'ям за заданим шаблоном.

#### Налаштування моделі (Model properties)

1. *Змінити параметри моделі* (**Change model properties**) – визиває діалогове вікно з усіма змінними параметрами моделі.

**Панель вкладок.** Слугує для відображення результатів розрахунку.

Перша вкладка, вона є і найголовніша, призначена для відображення так званих візуальних шарів, які накладаються один на інший. Приклад вигляду цієї вкладки можна побачити на рис. 17.

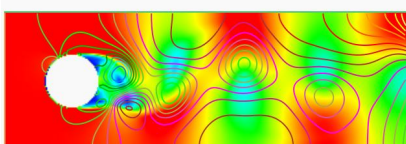


Рис. 17. Вкладка Visual, на якій накладені два візуальні прошарки

Наступна вкладка відповідає за числове представлення результатів розрахунку.

Вона має елемент управління, який дозволяє вибрати змінну, значення якої необхідно відобразити на екрані. В налаштуваннях системи можна також вибрати формат представлених чисел.

**Бокова панель.** Містить вкладки з налаштуваннями геометрії задачі (завдання граничних умов), а також панель редагування візуальних прошарків.

**Вкладка Geometry** – містить у собі список всіх границь для даної геометрії, та дозволяє виставити на кожну з них набір граничних умов. Геометрія має п'ять різних границь, кожній з них можливо присвоїти своє унікальне ім'я, яке дозволить виділити одну границю з поміж інших. У кожній границі також присутній колір, який співпадає з кольором, представленим на зображенні геометрії. За допомогою подвійного натискання лівої кнопки миші можна відкрити діалогове вікно редагування імені границі і її граничних умов.

**Вкладка VisualLayers** – містить список візуальних прошарків для даної задачі. Кожен тип візуального прошарку має своє зображення, це зроблено для того, щоб легше було визначити тип візуалізатора. Поблизу піктограми присутній "CheckBox" – елемент управління, який, у даному випадку, виконує роль індикатора, встановлюючи значення, яке характеризує необхідний у даний момент прошарок для візуалізації. Як і у випадку з границями, візуальні прошарки теж мають власні імена, які можна задати в діалоговому вікні редагування прошарку. У самому низу вкладки присутня кнопка додавання нового візуального прошарку. Також, хотілось відмітити ще одну особливість у даній вкладці, якої, наприклад, немає в FlowVision, це можливість за допомогою Drag&Drop змінити порядок відображення прошарків, що може бути дуже доречним у випадку, коли один із прошарків перекриває інший.

**Панель статусу.** Призначена для відображення службової інформації, такої, як поточний час розрахунку та індикатор запису анімації.

**Діалогове вікно "Нова задача" (NewProblem).** Це перше діалогове вікно з яким зустрічається користувач під час роботи с системою. Створення нової задачі потребує вибір моделі задачі та її назви. Всі моделі повинні знаходитись у папці Plug-ins/Models кореневої директорії. Вони представляють собою скомпільовані бібліотеки класів. У кожній із моделей присутні такі атрибути: назва моделі, версія, короткий опис, автор. Встановлення назви задачі потрібно для того, щоб у подальшому краще ідентифікувати її, наприклад, під час запису анімації використовується ім'я задачі в назві файлу анімації.

**Діалогове вікно "Перейменувати" (Rename).** Призначене для зміни назви поточної задачі, яка, можливо, була задана помилково. Для того щоб, нова назва була прийнята, необхідно після введення її натиснути на кнопку «ОК».

**Діалогове вікно "Налаштування границі" (Boundaryproperties)**

Кожній із границь геометрії повинний відповідати набір граничних умов (для кожної із розрахункових змінних задачі). Кожна модель має свій набір граничних умов.

**Діалогове вікно "Налаштування візуального прошарку" (VisualLayerProperty).** За допомогою цього діалогового вікна можливо вибрати яку змінну задачі,

яким візуальним способом відображати. Діалогове вікно, яке складається з трьох частин. У верхній частині знаходиться текстове поле з назвою візуального шару. Далі знаходяться два елементи управління: перший призначений для вибору змінної, яку потрібно візуалізувати, другий – для вибору методу візуалізації. У третій частині знаходиться панель вкладок, в яких розміщені параметри візуалізатора.

Налаштування візуалізатора розміщені у двох вкладках: Загальне (General), Покриття (Cover).

Вміст вкладки General формується динамічно і залежить від того, який тип візуалізатора вибраний. На даному етапі система підтримує три види візуалізації: ізолінії, заливка кольором, вектори. Свої індивідуальні налаштування мають два останні візуалізатори.

Параметри:

- Line thickness* – визначає товщину ізолінії.
- Isolines count* – вказує на кількість ізоліній.
- Stepx* – крок векторів по осі x.
- Stepy* – крок векторів по осі y.
- Thickness* – товщина векторів.

Всі типи візуалізації мають можливість встановлення кольорової палітри, за допомогою якої можливо краще відрізнити різноманітні ділянки однакового рівня. Є можливість завантажити або зберегти палітру в файл, що дозволяє використання їх без необхідності повторного завдання. Присутня можливість вибору проміжку (мінімального і максимального значення) для якого буде побудована палітра. Ручне редагування самої палітри відбувається дуже зручним способом. Просто вводиться нове значення рівня (в проміжку [0;1], який в подальшому приводиться до проміжку [min\_value; max\_value]), та вибирається колір. Видалення якогось значення із палітри відбувається виділенням його і натисненням кнопки Delete.

**Діалогове вікно “Налаштування моделі” (ModelProperties).** Кожній із моделей притаманні свої параметри, які дозволяють краще адаптувати її для своєї задачі.

Тут можна виділити такі параметри моделі гідродинаміки:

- Stepx* – крок комірки по осі x.
- Stepy* – крок комірки по осі y.
- Pressureiterations* – кількість ітерацій для розрахунку тиску рідини.
- Timestep* – крок за часом.
- DeltaReynolds* – значення сіткового числа Рейнольдса (перший параметр моделі турбулентності).
- Kinematicviscosity* – значення кінематичної в'язкості (другий параметр моделі турбулентності).
- Mixinglength* – довжина перемішування (третій параметр моделі турбулентності).
- Turbulencemodel* – модель турбулентності (одно- або трипараметрична).

**Діалогове вікно “Уподобання користувача” (Preferences).** Це діалогове вікно містить в собі різноманітні налаштування системи, які дозволяють краще персоналізувати її. Воно складається з вкладок, кожна з яких відповідає певній підсистемі. Розглянемо кожен із вкладок окремо.

*Preprocessing* – це підсистема попередньої обробки вхідних даних, сюди можна віднести механізм завантаження та обробки вхідної геометрії для задачі. На даний момент не має власних налаштувань.

*Postprocessing* – це підсистема обробки та візуалізації на екран розрахованих даних. Дана підсистема містить на даний момент один параметр (Updateintervals.), який характеризує час, за який відбувається оновлення візуальної інформації на екрані.

*DataOutput* – дана підсистема відповідає за обробку вихідних даних. Дана підсистема має такі налаштування:

*Steprecord* – крок по ітераціям, через який буде записаний один кадр анімації.

*File name template* – формат назви вихідного файлу анімації, який може включати три різних види підстановок:

- %problem% – назва поточної задачі;
- %date% – поточна дата, представлена у форматі yyyy-MM-dd;
- %time% – поточний час, представлений у форматі HH.mm.ss.

*Stringformat* – формат строки, яка представляє числові данні для вкладки Data.

**Головні акценти при розробці.** Під час розробки системи моделювання задач механіки суцільних середовищ були поставлені певні критерії та розставлені акценти, яким повинна задовольняти система.

Зокрема, ставилось за мету створення програмного засобу, який би вирішував різноманітні задачі, при чому щоб підключення нового типу задачі не вимагало б перекомпіляції початкового коду, а додавалося за допомогою плагінів. Також був зроблений акцент на максимально простому форматі геометрії для задачі, щоб її опис не потребував специфічних CAD систем, як зроблено в інших програмних засобах цього типу.

Так, наприклад, для того щоб завантажити геометрію для задачі, необхідно описати її в графічному файлі в одному з популярних форматів (наприклад BMP, PNG), різними кольорами позначити різні типи границь і зберегти. Розмірність зображення буде співпадати з кількістю клітинок по горизонталі і вертикалі для розрахункової сітки. В якості редактора геометрії в такому випадку може виступати будь який растровий редактор графіки, наприклад MS Paint, що робить дуже зручним і доступним механізмом для імпорту геометрії, на протигагу іншим системам, де використовується моделі із CADсистем.

Був також поставлений наголос на простоті та зручності в користуванні, не переобтяжувати користувача непотрібними функціями та елементами інтерфейсу.

На меті стояла необхідність у створенні компактної, легко транспортованої системи, яка б не займала багато місця і легко могла бути перенесена на інший комп'ютер на змінному накопичувачі, а також мала невисокі системні вимоги.

Було заплановано створити систему, використовуючи найсучасніші досягнення у галузі програмного забезпечення, а також підтримувати апаратне прискорення 2D графіки.

**Можливості та особливості системи.** Дана система комп'ютерного моделювання має багато можливостей та особливостей, які виділяють її серед інших систем свого класу. Розглянемо найголовніші із них:

- Динамічна система підключення нових задач. Для опису задачі необхідно розробити плагін і “підкинути” в папку с моделями програми. На даному етапі

- розроблений один тип моделі, який забезпечує моделювання гідродинамічних задач нестисливих рідин, на основі якої і були зроблені експерименти з обтікання тіл.
- Імпорт геометрії для задачі із файлу зображення в одному з популярних форматів (BMP, JPG, GIF, PNG, TIFF).
  - Підтримка запису візуалізації динаміки процесу у файл анімації (формат GIF), що дозволяє проаналізувати результати без необхідності мати під рукою програму, а просто переглянути процес у прискореному режимі, наприклад, у браузері, без необхідності проведення чисельних розрахунків.
  - Збереження задачі з усіма параметрами, включаючи геометрію, у файл досить компактного розміру (забезпечується за допомогою зіркомпресії на "льоту").
  - Збереження поточного стану розрахунку, що дозволяє продовжити чисельне моделювання поставленої задачі з новим запуском програми.
  - Відображення чисельних даних вибраної змінної (наприклад Velocity, Dynamicpressure).
  - Підтримка різних варіантів візуалізації як скалярних змінних, так і векторних (Isolines, Flood, Vectors).
  - Збереження та завантаження градієнтів кольорів для візуалізаторів дозволяє більш точно виділити різні зони для аналізу.
  - Наявність встановлення різноманітних уподобань користувача, які зберігаються з повторним запуском системи.
  - Простий та дружній інтерфейс користувача, в якому дуже легко розібратися початковому користувачеві.
  - Малий розмір пакета системи, який не потребує інсталяції і на жорсткому диску займає всього 1.84 МБ.
  - Система комп'ютерного моделювання написана із застосуванням найсучасніших програмних засобів, а саме: мова програмування C# 4.0 та платформа .NETFramework 4.0, що дає можливість багатоплатформового використання без перекопіювання під різні операційні системи.
  - Використання графічної підсистеми WPF, що наділяє програму гарним інтерфейсом користувача, плавними анімаціями, векторною графікою, легкими для читання шрифтами, вбудованою підтримкою 3D графіки.

**Переваги над іншими системами.** Проаналізувавши деякі системи моделювання (FlowVision, ANSYSFluent), розглянувши їхні можливості і виявивши їхні недоліки, можна провести аналіз цих систем, зрівняти з даною розробкою і виділити для неї ряд переваг.

Проаналізувавши ціни, які просять розробники за свої продукти, можна сказати, що вони не доступні для більшості людей, а повну ліцензію можуть дозволити лише великі компанії, та й не всім потрібні всі ті можливості, які вони пропонують.

Якщо взяти до уваги розміри інсталяційних пакетів, то ситуація не багато краща. Наведені вище пакети займають гігабайти місця на жорсткому диску.

Більшість з пакетів потребують спеціальної підготовки та навиків, що не дуже зручно для більшості користувачів.

Всі наведені вище пакети мають високі системні вимоги, що теж обмежує коло користувачів, які можуть ними повноцінно користуватись.

У системі комп'ютерного моделювання (CMS) усунути всі, наведені вище недоліки, що й ставить її у

вигідне становище серед розробок свого класу: так як вона безкоштовна, займає не багато місця (1.8 МБ), не потребує спеціальних навичок та вмінь (вже одразу після запуску непідготовлений користувач може повноцінно користуватися програмою), та має невисокі системні вимоги.

**Недоліки розробленої системи.** Розглянувши переваги, було б недоречно не вказати на недоліки розробленої системи.

- Підтримка (на даний момент) лише моделювання двовимірних задач.
- Моделювання лише гідродинаміки (для поповнення підтримуваних моделей необхідно розробити додаткові плагіни моделей).
- Неможливість локальної адаптації розрахункової сітки під геометрію задачі.
- Відсутність підтримки завдання рухомих границь.

**Висновки.** У даній роботі :

— побудовано математичну модель обтікання твердих тіл різної форми в'язкою рідиною, в якій турбулентність описано трьохпараметричною алгебраїчною моделлю;

— розроблено систему комп'ютерного моделювання задач руху рідини та газу ContinuumMechanicsSimulation (CMS);

— проведено різноманітні чисельні розрахунки задач обтікання рідиною твердих тіл різних форм у розробленому середовищі CMS. Під час чисельних експериментів була отримана так звана "Вихрова доріжка Кармана", яка з'являється при обтіканні тіл при високих числах Рейнольдса, що обумовлює турбулентний характер руху в'язкої рідини;

— освітлено головні можливості розробки, проведено порівняльний аналіз з системою FlowVision, а також зроблено детальний опис інтерфейсу користувача.

Система дозволяє працювати з будь якою геометрією задачі, підтримує моделі на рівні плагінів, що дозволяє динамічно їх підключати, має широкі можливості візуалізації результатів розрахунку, середовище дозволяє зберігати та відновлювати цільову задачу, має підтримку запису анімації з візуалізацією розрахунку. З додаткових характеристик системи можна виділити таке: система займає небагато місця, не потребує інсталяції, має дружній інтерфейс до користувача, не потребує високих системних вимог, має високу швидкодію (на противагу системі FlowVision).

Отримані чисельні дані підтверджуються експериментально, що дає змогу говорити про адекватність математичної моделі і дозволяє успішно моделювати подібні явища, що має велике прикладне значення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Theodore von Kármán. Aerodynamics. // McGraw-Hill. — 1963. — P.123—128.
2. Irwin, Peter A. «Vortices and tall buildings: A recipe for resonance» // Physics Today (American Institute of Physics). — 2010. — P.68—69.
3. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. — М.: Наука, 1984. — 20 с.
4. Огурцов А. П., Самохвалов С. Е., Надригайло Т. Ж. Метод расщепления в задачах гидродинамики и теплопереноса. — Днепропетровск: Системные технологии, 2003 — 260 с.

