

Розробка програмно-методичного забезпечення з розрахунків тепло-газодинамічного стану при надзвуковому обтіканні тіла з врахуванням інтерференції конфігурацій

Разработка программно-методического обеспечения для расчетов тепло-гидродинамического состояния при сверхзвуковом обтекании тела с учетом интерференций конфигураций

The development of computational fluid dynamics and heat transfer software for supersonic flow interactions

1. Номер державної реєстрації теми - 0114U003420 .

2. Науковий керівник - д.т.н., проф. Панов Є.М., Панов Е.Н., Panov Evgen M.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Розроблено на підставі фізичних уявлень про взаємодії ударні хвилі – турбулентний пограничний шар та інтерференції конфігурацій, які викликані ударно-ударними взаємодіями, математичні моделі тепло-газодинамічного стану для дослідження надзвукового обтікання літальних апаратів (ЛА) з врахуванням стисливості середовища та дисипативних ефектів, що спричиняють інтенсивне їх нагрівання. Створено тривимірні числові моделі тепло-газодинамічного стану надзвукових ЛА для дослідження інтерференцій різних конфігурацій, обумовлених такими системами як корпус-аеродинамічний руль, корпус-перпендикулярний циліндр, корпус-газовий струмінь, що виходить перпендикулярно або під кутом до нього, корпус-клиновидна надбудова. Проведено верифікацію розроблених числових моделей фізичного стану під час надзвукового обтікання елементів ЛА для дослідження взаємодій стрибка ущільнення з турбулентним пограничним шаром та інтерференцій конфігурацій з використанням експериментальних даних, отриманих на канонічних конфігураціях ЛА в надзвукових трубах. Виконано оцінки різних моделей турбулентності та числових розв'язувачів сформульованої задачі на прикладі надзвукового крила та встановлено, що найбільш достовірні дані можуть бути отримано з використанням $k-\omega$ SST моделі турбулентності та розв'язувача з корегуванням густини rhoCentralFoam, що є складовою вільного відкритого програмного забезпечення OpenFOAM. Розроблено програмно-методичне забезпечення на базі вільного відкритого програмного коду OpenFOAM для проведення числового аналізу полів течії середовища, теплообміну та прогріву ЛА при надзвуковому обтіканні тіл, що є потужним інструментом для вивчення взаємодій ударна хвиля – турбулентний пограничний шар та інтерференцій різних конфігурацій. Завдяки своїй універсальності, дані розробки можуть бути використані не тільки для дослідження надзвукових ЛА, але й при числовому аналізі тепло-гідродинамічного стану, наприклад, різноманітного теплообмінного та пічного обладнання. Результати роботи впроваджено у виробництво.

(рос.)

Разработаны на основе физических представлений о взаимодействиях ударные волны – турбулентный пограничный слой и интерференции конфигураций, вызванные ударно-ударными взаимодействиями, математические модели тепло-газодинамического состояния для исследования сверхзвукового обтекания летательных аппаратов (ЛА) с учетом сжимаемости среды и диссипативных эффектов, вызывающих интенсивное их нагревание. Созданы трехмерные численные модели тепло-газодинамического состояния сверхзвуковых ЛА для исследования интерференций разных конфигураций, обусловленных такими системами как корпус-аэродинамический руль, корпус-перпендикулярный цилиндр, корпус-газовый поток, выходящий перпендикулярно или под углом к нему, корпус-клиновидная надстройка. Проведена верификация разработанных численных моделей физического состояния при сверхзвуковом обтекании элементов ЛА для исследования взаимодействий скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем и интерференций конфигураций с использованием экспериментальных данных, полученных на канонических конфигурациях ЛА в сверхзвуковых трубах. Выполнены

оценки разных моделей турбулентности и численных решателей сформулированной задачи на примере сверхзвукового крыла и установлено, что наиболее достоверные данные могут быть получены с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности и решателя с коррекцией плотности rhoCentralFoam, входящего в состав свободного открытого программного обеспечения OpenFOAM. Разработано программно-методическое обеспечение на основе свободного программного кода OpenFOAM для проведения численного анализа полей течения среды, теплообмена и прогревания ЛА при сверхзвуковом обтекании тел, что является мощным инструментом для изучения взаимодействий ударная волна – турбулентный пограничный слой и интерференций различных конфигураций. Благодаря своей универсальности, данные разработки могут быть применены не только для исследования сверхзвуковых ЛА, но и при численном анализе тепло-гидродинамического состояния, например, различного теплообменного и печного оборудования. Результаты работы внедрены в производство.

(англ.)

Gas-dynamic and heat transfer mathematical model of supersonic flow over flying vehicles is developed. The model is taken into account with medium compressibility and dissipative effects leading to an increase of heating rate. Proposed model is based on physical interaction of shock wave and boundary layer. Three dimensional numerical models of flying vehicles in gas-dynamic states are developed in order to investigate different configurations concerning such systems as case - sharp swept fin, case - perpendicular cylinder, case - gas jet, case - sharp unswept fin. Experimental data, received from classical configurations of flying vehicles in supersonic flows, is used with the purpose of validation and verification of developed mathematical models of physical state during shock wave. This enables us to investigate turbulent boundary layer interactions. Assessment of different turbulence models and numerical solvers is performed. On the basis of numerical results of supersonic wing problem it is determined that reliable data can be obtained with $k-w$ SST turbulence model and rhoCentralFoam solver. RhoCentralFoam is the part of OpenFOAM that is free open source software. New software is developed on the basis of OpenFOAM code with the purpose of numerical investigation of supersonic flow fields, heat transfer and solid body warming process. It is a powerful tool for the research of such interactions as supersonic shock wave - turbulent boundary layer and interferency of different configurations. Because of its universality this development can also be used for numerical analysis of different heat-exchange or high temperature equipment. The results of the work are implemented in production.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

- Заявка u201511173 Україна, МПК(2015.01) G01K 17/00. Спосіб визначення густини теплового потоку твердого тіла в прозорому для інфрачервоного випромінювання рухомому середовищі / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, С. В. Лелека, И. О. Мікульонок, А. Ю. Педченко (UA) ; заявник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u201511173 ; заявл. 13.11.15.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Розробки НДР відповідають світовому рівню (NASA (National Aeronautics and Space Administration – Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору), ESA (European Space Agency – Європейське космічне агентство), ДП «КБ «Південне»), зокрема, за рівнем програмної реалізації та методичного забезпечення для виконання тепло-гидродинамічних розрахунків при надзвукового обтіканні літальних апаратів і опубліковані у фахових журналах, що входять до наукометричних баз.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування розробок НДР при проектуванні нових літальних апаратів має вагомі техніко-економічні переваги, порівняно з експериментальними дослідженнями:

- в першу чергу це відмова від використання надкоштовних експериментальних зразків ЛА, що в свою чергу забезпечує економію значних матеріальних та часових ресурсів, підвищує конкурентоспроможність розробників ракетно-космічної техніки;

- по-друге застосування методів наукоємного комп'ютерного інжинірингу надає змогу віртуально досліджувати взаємодії ударна хвиля – турбулентний пограничний шар та ударно-ударні інтерференції конфігурацій при надзвуковому обтіканні ЛА з метою мінімізації негативних наслідків цих явищ, а саме виникнення пікових статичних, динамічних й теплових навантажень, зростання енергетичних втрат, зниження ефективності органів управління.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).
Підприємства аерокосмічної галузі – ДП «КБ «Південне», Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та ін.

8. Стан готовності розробки.

Робота у вигляді програмно-методичного забезпечення для виконання числового аналізу підчас надзвукового обтікання ЛА, розробленого на базі вільного відкритого програмного продукту OpenFOAM, готова до впровадження.

9. Існуючі результати впровадження.

Основні теоретичні положення роботи, що пов'язані з математичними моделями турбулентності, викладені у монографії грифом Вченої ради НТУУ «КПІ» на тему: «Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий». За матеріалами роботи захищено кандидатську дисертацію на тему: «Закономірності процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах - електрокальцинаторах». Видано навчальні посібники з грифом НАН України та грифом Вченої ради НТУУ «КПІ» на теми: «Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання» і «Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів». Результати роботи впроваджені у виробництво на ПАТ «Укрграфіт» м. Запоріжжя. Предметом впровадження є методики та результати розрахунків за допомогою розробленого програмно-методичного забезпечення для визначення тепло-газодинамічного стану пічного обладнання геометрії зони газифікації та витрати водяної пари необхідної для стійкого протікання процесу утворення синтез-газу з врахуванням безпечної концентрації водню та характеристик матеріалу, що прожарюється. Результати НДР у вигляді програмно-методичного забезпечення для дослідження надзвукових ЛА заплановано впровадити на ДП «КБ «Південне» (м. Дніпропетровськ) та в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

10. Форма участі інвестора. В реалізації результатів проекту частка інвестора 100%, а частка від прибутку 75%.

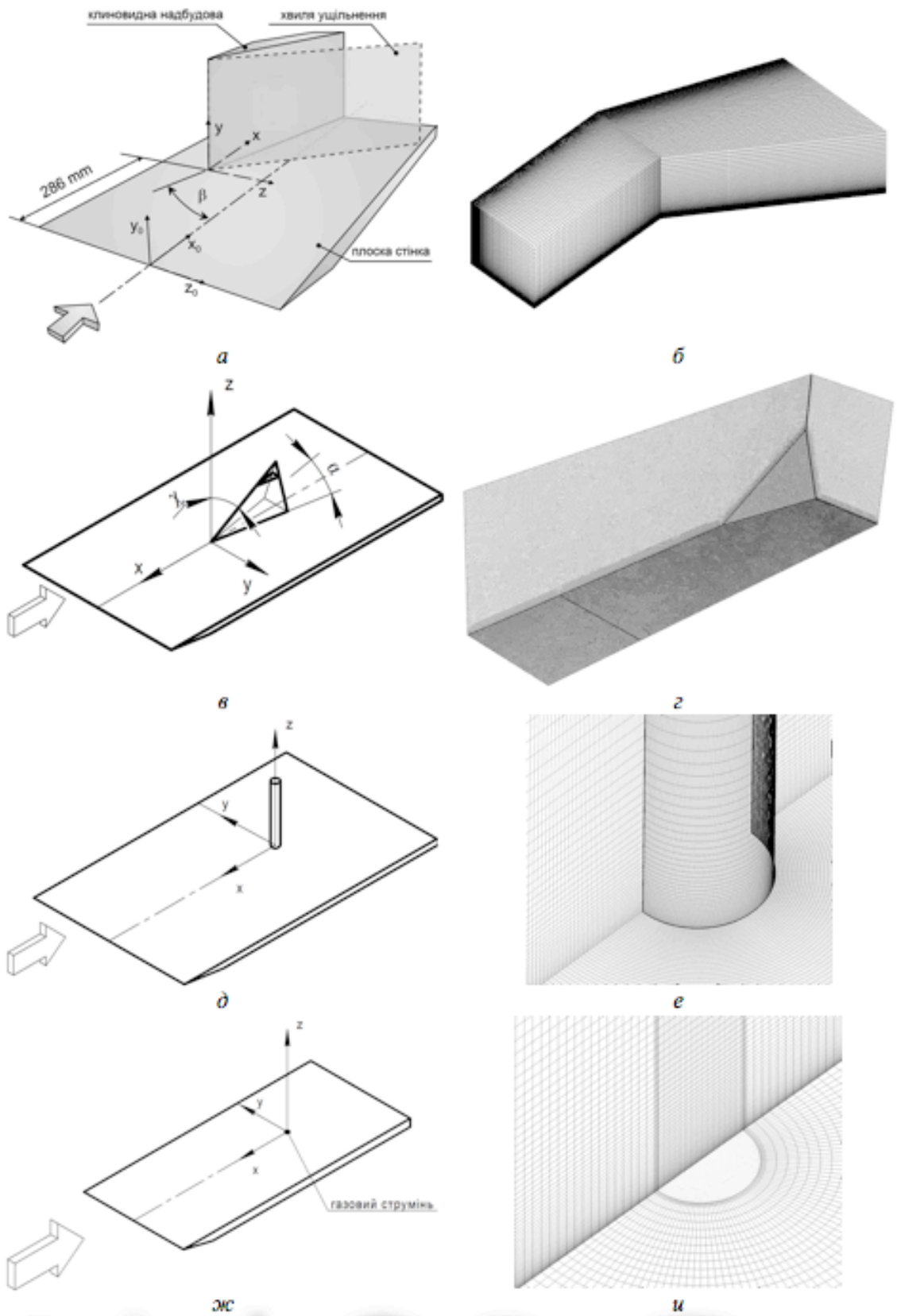
11. Обсяг інвестицій \$200,000.

12. Мета інвестицій – забезпечення високошвидкісних обчислювальних ресурсів, тренінг користувачів програмно-методичного забезпечення.

13. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", інженерно-хімічний факультет, науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ»), 406-83-09, admin@rst.kpi.ua

14. Графічна презентація розробки



Тривимірні геометричні (а, в, д, ж) та дискретизовані (б, г, е, и) моделі канонічних конфігурацій ЛА

а, б – корпус – клиновидна надбудова; в, г – корпус – аеродинамічний руль;
 д, е – корпус – перпендикулярний циліндр; ж, и – корпус – газовий струмінь



Лінії плівкової течії по твердій стінці в порівнянні з лініями поверхневої течії крапель у експерименті (конфігурація корпус – газовий струмінь)

15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий [Текст] : моногр. / И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий и др. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 176 с.
2. Карвацький А.Я. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання : навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 234 с. Гриф надано Міністерством освіти і науки України (Лист № 1/11-2299 від 11.02.2014 р.)
3. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Текст]: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. – 392 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 4 від 12.05.2015 р.).
4. Числове моделювання обтікання профілю крила надзвуковим потоком з використанням програмного коду Openfoam / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, А. Ю. Педченко, І. В. Пулінець, Т. В. Лазарев // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2015. — № 2. — С. 69—78.
5. Complex heat transfer at directed crystallization of semitransparent materials / V. I. Deshko, A. Ya. Karvatskii, A. M. Kudin, Yu. V. Lokhmanets // Functional Materials. — 2014. — 21, No.1. — P. 92—104.
6. Численное моделирование сверхзвуковых течений с применением открытого программного кода OpenFOAM / А. Я. Карвацький, І. В. Пулінець, А. Ю. Педченко, Т. В. Лазарев // Космічна наука і технологія. — 2015. Т. 21, №2. — С. 47—52.
7. Карвацький А. Я. Сучасний стан проблеми теоретичного дослідження надзвукового обтікання тіл за різних конфігурацій / А. Я. Карвацький // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2015. — № 1(14). — С. 5—12.
8. Жученко А. І. Математична модель процесу скловаріння / А. І. Жученко, А. Я. Карвацький, В. С. Цапар // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2014. — № 2(13). — С. 97—104.

9. Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, T. B. Shilovich, T. V. Lazarev, A. S. Moroz // Chemical and Petroleum Engineering. — 2014. — Vol. 50, Nos. 5–6. — P. 312—322.
10. Дослідження взаємодій стрибок ущільнення – пограничний шар при надзвуковому обтіканні тривимірних конфігурацій / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 5/4(77). — С. 4—11. (Index Copernicus) : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/50911/47871>.
11. Числовий аналіз двовимірної задачі надзвукових взаємодій стрибка ущільнення з пограничним шаром / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Інформаційні системи. Механіка та керування. — 2015. — № 11. (у друці).
12. Застосування вільного програмного коду OpenFOAM при моделюванні обтікання ромбовидного профілю крила надзвуковим потоком [Електронний ресурс]/ Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, А. Ю. Педченко, Т. В. Лазарев // Аеродинаміка та безпека польотів : матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2015”, 28–29 квітня 2015 року, Київ, Україна. — К.: НАУ, 2015. — С. 17.9—17.12. — Режим доступу:http://avia.nau.edu.ua/doc/2015/AVIA_2015.pdf.

16. ГАЗОДИНАМІКА, НАДЗВУКОВИЙ ПОТІК, ПОГРАНИЧНИЙ ШАР, УДАРНА ХВИЛЯ, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ КОНФІГУРАЦІЙ, ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ