

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ МЕТАНУ В МІКРОКАНАЛІ

А. О. Бурлака¹, С. М. Пономаренко¹

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

Анотація

При випробовуваннях моделі для симуляції горіння суміші метану та кисню в мікроканалі було отримано режим осцилюючого полум'я, розглянуто його характеристики, проаналізовано недоліки даної моделі.

Ключові слова: горіння, мікроканал, осцилююче полум'я, моделювання горіння

Вступ

Створення мініатюрних енергоперетворюючих пристроїв, що представляють собою комбінацію малорозмірної камери згорання і пристрою, що перетворює тепло горіння в електричну енергію є актуальним на сьогодні, адже такі установки, які використовують тепло згорання вуглеводневих палив, потенційно могли б мати більшу енергоемність при однаковій масі і розмірах порівняно з традиційними електричними акумуляторами [1, 2].

У той же час недолік фундаментальних знань про процеси горіння в мікромасштабі перешкоджає створенню малорозмірних камер згорання. Зі зменшенням розміру камери згорання зростає відношення поверхні камери до її об'єму, що приводить до збільшення тепловтрат з полум'я і труднощів організації стійкого горіння.

1. Вплив градієнту температур та коефіцієнту теплопровідності стінки на стійкість горіння

Однією із перешкод на шляху створення малорозмірних пальників є, як зазначалося вище, неможливість стабілізації полум'я в пристроях з характерними розмірами менше деякого критичного значення через велику кількість сумарних тепловтрат. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є використання пальників з рециркуляцією тепла між продуктами горіння і вихідними реагентами без їх перемішування. У таких пристроях відбувається повернення тепла з області гарячих продуктів горіння в область свіжого газу. Застосування регенерації тепла призводить до зменшення сумарних тепловтрат в навколишнє середовище і можливості стійкого горіння вкрай бідних горючих сумішей в малорозмірних системах [3].

Одним з широко відомих прикладів пальника з регенерацією тепла є спіральний пальник «Swiss Roll», який дозволяє, наприклад, спалювати збіднені суміші, які містять в 5 разів меншу кількість метану в

порівнянні з граничною сумішшю метану з повітрям для вільно поширюваного полум'я [4].

Характерною особливістю процесів горіння в малорозмірних системах є інтенсивне теплова взаємодія між газовою і твердою фазами, яка істотно впливає на процеси стабілізації, стійкості і динамічну поведінку полум'я. В даний час теоретичні дослідження нестационарних процесів в системах з регенерацією тепла, наприклад, поширення нестационарних хвиль горіння і дослідження їх стійкості, тільки починаються. Труднощі тут пов'язані, перш за все, з тим, що рішення навіть стаціонарної задачі горіння для пристрою подібного «Swiss Roll» вимагає врахування теплообміну між усіма витками такого пальника, обліку радіаційних тепловтрат і складної геометрії пристрою на додаток до складного розрахунку хімічних реакцій і газодинаміки. У зв'язку з цим, фундаментальні дослідження процесів горіння в системах з рециркуляцією тепла спрямовані, в першу чергу, на вивчення особливостей взаємодії дифузійно-теплових і гідродинамічних процесів, хімічних реакцій, тепловтрат і міжфазного теплообміну в рамках простих, з геометричної точки зору, постановок [3].

При дослідженні горіння газів у вузькому каналі з теплопровідними стінками було виявлено, що полум'я може поширюватися в каналі, поперечний розмір якого менше критичного значення [5, 6], що визначається з класичної теорії [7], в якій не враховувався нагрів стінок каналу.

Експерименти з горіння в вузькому прямому каналі і в вузькому зазорі між двома круглими пластинами з радіальною подачею газу, що підігріваються зовнішнім джерелом тепла, показали велику різноманітність режимів горіння. В прямому каналі в залежності від витрати свіжої суміші можливе або стійке горіння, або горіння в режимі періодичного займання і загасання полум'я.

На стійкість горіння впливає коефіцієнт теплопровідності стінки, що і показано в роботі [8]. Для стінок з низькою теплопровідністю полум'я розташоване полум'я знаходиться значно нижче за течією і передача

полум'я від пальника може відбуватися залежно від довжини пальника та витрати. Крім того, низький тепловий потік через стінку до виходу потоку викликає низьку температуру стінки вгорі. В результаті, попереднє нагрівання сповільнюється і температура спалаху досягається повільніше, що призводить до опускання полум'я вниз по течії. Полум'я стає більш схильним до нестабільності при погіршенні передачі тепла вздовж потоку. Коли провідність стінки трохи збільшується і досягається середнє значення, відбувається різке опускання місця розташування полум'я до входу. У цьому випадку стабільність полум'я повністю встановлюється. У тих системах, що мають стінки з високою теплопровідністю та низькими тепловими втратами, теплопровідність на стінках відіграє незначну роль у встановленні полум'я. Результати показують, що дуже важливими є провідність на стінці та коефіцієнт конвективного теплопередачі рідини з пальника для визначення перекачування тепла вгору за течією, що необхідне для підтримання горіння.

2. Постановка задачі та отримані результати

В цій роботі розглянуто модель горіння попередньо перемішаної суміші метану та повітря в мікроканалі діаметром 2 мм та завдовжки 200 мм. Геометрію побудовано за допомогою програмного забезпечення SolidWorks 2017. Подальші операції – побудова сітки, налаштування та виконання розрахунків було здійснено за допомогою програмного забезпечення Ansys Workbench 19.0 та Ansys CFX 19.0. Характеристики сітки зображено на рис. 1

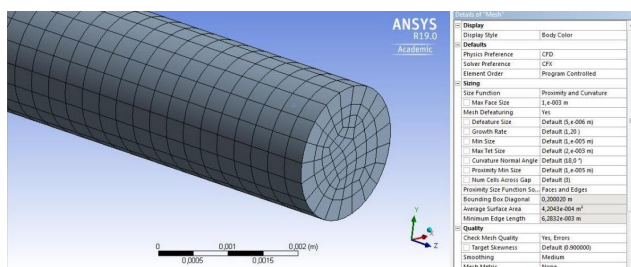


Рис. 1. Розрахункова область

В якості початкових умов було задано температуру суміші на вході 300 K, коефіцієнт теплопровідності стінки $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ та температуру за стінкою – 800 K, швидкість входу суміші – 0,05 м/с. Склад суміші в масових долях наведено в табл. 1

Табл. 1. Масові долі компонентів вхідної суміші

CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
0,1	0,232	0,01	0,01	0,648

Варто зазначити, що малі концентрації води і вуглекислого газу введено для ініціювання горіння. В якості механізму горіння використовувався механізм MethaneAir WD 1 NO.

При першому запуску моделі отримано процес так званого осцилюючого полум'я. Подібні процеси

вже спостерігались іншими дослідниками, і, один з таких, описано в експериментальній роботі [8]. Було обраховано близько 130 ітерацій, проте пізніше рішення розійшлося. Швидше за все, це пов'язано з недосконалістю даної сітки, які будуть надалі виявлені і виправлені. Результати, які зафіксовані перед розходженням рішення, наведено на рис. 2.

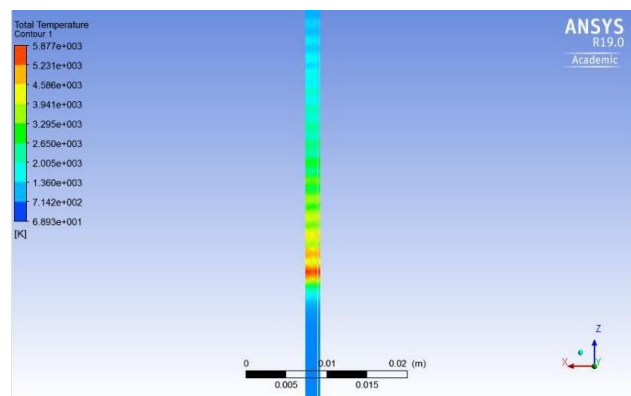


Рис. 2. Температурне поле

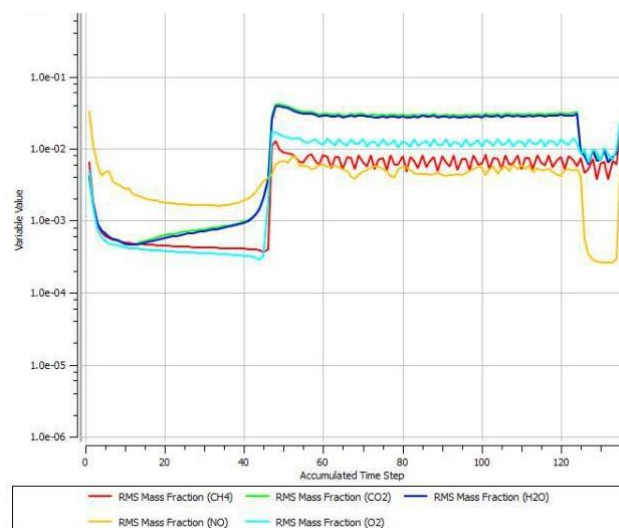


Рис. 3. Масові фракції компонентів

В зв'язку з помилкою рішення, було зменшено крок по часу з $1 \dots 0.01 \text{ с}$, та здійснено відповідні розрахунки. Обрахунок понад 9000 ітерацій, зайняв майже 24 години машинного часу. На жаль, технічні можливості обмежують подальші розрахунки, але на наведених результатах можна спостерігати початковий етап процесу, а саме стабільне горіння та його дестабілізацію.

Висновки

При випробовуваннях моделі для симуляції горіння суміші метану та кисню в мікроканалі було отримано режим осцилюючого полум'я, наведено результати та проаналізовано недоліки даної моделі. Для покращення результатів було зменшено до 0.01 с та проведено попередні розрахунки. Отримано явище осциляцій полум'я, що відповідає уже

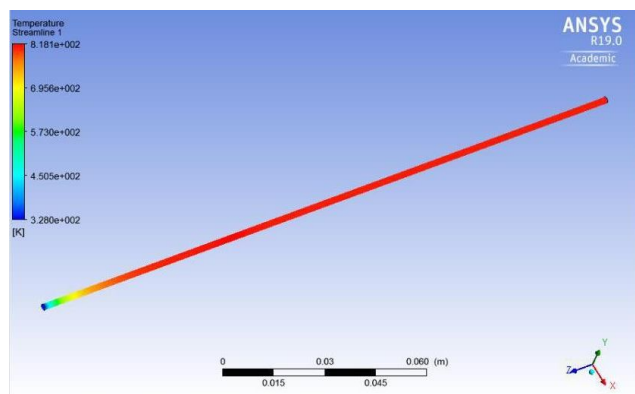


Рис. 4. Температурне поле в мікроканалі початкового етапу розрахунків покращеної моделі

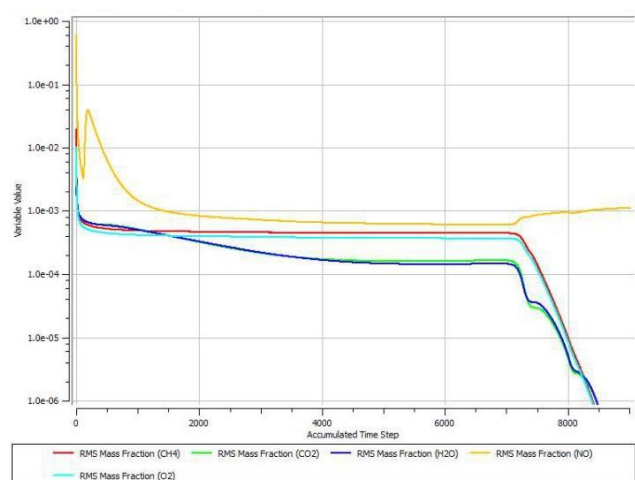


Рис. 5. Масові фракції в мікроканалі початкового етапу розрахунків покращеної моделі.

відомим експериментальним роботам з подібними характеристиками.

Перелік використаних джерел

1. Fennandez-Pello A. C. Micropower generation using combustion: issues and approaches // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — Vol. 29. — P. 883–899.
2. Dunn-Rankin D., Leal E. M., Walther D. C. Personal power systems // *Prog. in Energy and Combust. Sci.* — 2005. — Vol. 31. — P. 422–465.
3. Режимы горения предварительно перемешанной смеси газов в нагретом микроканале с плавно возрастающей по потоку газа температурой стенок / Д. Б. Мазурок, Р. В. Фурсенко, С. С. Минаев и др. // *Физика горения и взрыва.* — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 30–36.
4. Lloyd S. A. Combustion in double spiral burners // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* — 1994. — Vol. 33, no. 7. — P. 1809–1816.
5. Замашиков В. В. Особенности горения пропано- и водородо-воздушных смесей в узкой трубке // *Физика горения и взрыва.* — 1997. — Т. 33, № 6. — С. 14–21.
6. Замашиков В. В. О горении газа в узкой трубке // *Физика горения и взрыва.* — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 22–26.
7. Зельдович Я. Б. Теория распространения тихого пламени // *Журнал экспериментальной и теоретической Физики.* — 1941. — Т. 11, № 1. — С. 159–168.
8. Namazian Zafar, Hashemi Heidar, Namazian Jafar. Combustion in micro channel investigating the effect of wall thermal conductivity of micro-channels on flame stability // *International Journal of Science, Technology and Society.* — 2015. — Vol. 3, no. 1. — P. 24–27.