УДК 004.942:662.612.2:662.997
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/02

Дульський А.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірий О.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-БІОГАЗ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я

Використання біогазу в енергетиці пропонує численні переваги, включаючи можливість використання відновлюваних джерел енергії. Це стає дедалі важливішим у контексті глобальних зусиль щодо зменшення залежності від викопного палива, особливо на фоні зростаючого попиту на енергоресурси. Однак високий вміст CO_2 у біогазі створює певні виклики для процесу згоряння, серед яких одним із найсуттєвіших є зниження нормальної швидкості поширення полум'я, яка у біогазу становить лише 15–25 см/с, що негативно впливає на стабілізацію факелу. Це робить дослідження у сфері горіння біогазу перспективними, оскільки вони сприяють розвитку технологій, які можуть забезпечити більш ефективне використання цього виду палива в енергетичних установках.

Стаття присвячена моделюванню процесу горіння метано-біогазової суміші в струменево-нішевій системі (СНС) спалювання та стабілізації палива. Для створення CFD-моделі використано сучасні програмні засоби для моделювання.. У статті розкрито вплив геометричних та режимних параметрів СНС на процес горіння при різних співвідношеннях компонентів метан-CO_2.

Зокрема, встановлено, що додавання 30% CO_2 до метану суттєво змінює гідродинамічний параметр q, збільшуючи його з 11,877 до 23,3 при незмінній геометрії стабілізатора. З'ясовано, що це також призводить до зниження пікової температури (до 140°C), що є важливим фактором для зменшення викидів шкідливих речовин, таких як NO_x. Визначено, що зниження викидів NO_x при додаванні 30% CO_2 становить приблизно 40% у порівнянні з чистим метаном, що є вагомим досягненням у контексті екологічної безпеки.

У статті також акцентовано увагу на необхідності збільшення витрати біогазу для досягнення теплової потужності, еквівалентної тій, що забезпечується при спалюванні природного газу, та розглянуто проблеми, які виникають внаслідок цього, з наданням рекомендацій щодо їх вирішення.

Ключові слова: *Біогаз, метан-CO_2 суміш, CFD-модель, струменево-нішева система, розподіл температур.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах надмірне використання традиційних палив та негативний вплив парникових газів на довкілля сприяли посиленню досліджень у сфері виробництва відновлюваної енергії з органічних ресурсів та відходів. Світовий попит на енергію залишається високим, причому більшість енергії виробляється з викопних ресурсів. Останні дослідження свідчать про те, що анаеробне бродіння є альтернативною та ефективною технологією, яка поєднує виробництво біопалива та стійке управління відходами. Біогаз – це суміш, що складається з двох третин метану (CH_4) і решти, переважно, діоксиду вуглецю (CO_2) з домішками сірководню. Відпрацьована суспензія після виробництва біогазу може бути збагачена для використання як добриво для сільськогосподарських культур, що сприятиме стійкому виробництву біомаси у світі.

Потенціал України у розвитку виробництва біогазу є величезним. Відмінну сировинну базу для цього створюють відходи добре розвиненого сільського господарства нашої країни. Біогаз має широкий спектр можливих форм використання (опалення, електрика та паливо). Одним з яких є його використання в сучасних технологіях спалювання як домішки до основного палива, з метою часткового заміщення традиційного палива [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці багато європейських країн успішно інтегрували біогаз у свої енергетичні сектори через різні шляхи використання. Щорічне виробництво енергії з біогазу становить близько 42 ТВт-год

у Німеччині (найвищий показник у ЄС), 9 ТВт-год у Великобританії та 2,8 ТВт-год у Франції; в кожній з цих країн біогаз в основному використовується для виробництва електроенергії. У Швеції виробляється близько 1,7 ТВт-год з біогазу, і 44% виробництва біогазу очищується до біометану і використовується як паливо для транспортних засобів. В Італії біогаз в основному використовується для виробництва електроенергії, тоді як інші шляхи, такі як введення в газову мережу та комбіноване виробництво тепла та електроенергії [3].

Біогаз в основному складається з метану та діоксиду вуглецю (CO_2) з деякими домішками. Його склад, однак, змінюється залежно від методу бродіння, часу утримання в бродильнику та типу біомаси. Загалом, відсоток метану (за об'ємом) у складі біогазу може варіюватися від 45% (приблизно 55% CO_2) до 80% (приблизно 20% CO_2) та інших газів в набагато меншому відсотковому співвідношенні (в основному H_2S, NH_3,H_2 – до 3% разом). Однак типовий склад біогазу це до 70% метану і 40% CO_2 за об'ємом. Біогаз в порівнянні з іншими альтернативними паливами має відносно високу теплоту згорання до 25 МДж/м^3 [2].

Варто зазначити, що значна кількість діоксиду вуглецю (CO_2) в біогазі впливає на його щільність, теплотворну здатність та нормальну швидкість поширення полум'я (у біогазу 15–25 см/с, у природного газу 38 см/с). Чим нижча нормальна швидкість розповсюдження полум'я тим більшу увагу потрібно звертати на стабілізацію факелу щоб уникнути його зриву. Також зміна щільності газу спричиняє зміну витрати пального, який проходить через отвори пальника, що призводить до зміни швидкості витікання газу через сопла та отвори пальників. Це також змінює аеродинамічні умови змішування газу з дуттьовим повітрям та впливає на повноту згоряння та теплову потужність пальника. При цьому додавання CO_2 знижує температуру продуктів згорання, що сприяє зменшенню викидів NO_x [1, 3].

Згідно з [5] ефективність робочого процесу паливоспалювального устаткування визначається технологією спалювання палива. Належна організація технологічного процесу паливоспалювальних систем забезпечує ефективність використання енергоресурсів та надійність устаткування. Перспективними є пальникові пристрої, розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема ті що реалізують Струменево-нішеву технологію спалювання (СНТ) (рис. 1, а). Основні принципи СНТ включають:

– ефективний розподіл палива в потоці окиснювача;

– стабільну регульовану структуру течії палива, окиснювача і продуктів згоряння;

– саморегулювання складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу;

– ефективне самоохолодження пальника;

– попередній підігрів пального [5].

Актуальним напрямом подальшого розвитку зазначеної технології є визначення можливості спалювання альтернативних палив, або їх суміші з природним газом в пальниках СНТ.

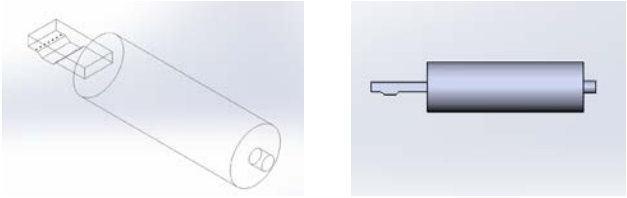
Робочий процес пальників СНТ визначається ефективністю роботи гідродинамічного стабілізатору полум'я – струменево-нішевою системою (СНС) (рис. 1, б).

а б

Рис. 1. Струменево-нішева технологія спалювання палива: а – пальник, б – горіння поодинокого струменю в (СНС)

Постановка завдання. Метою роботи є імітація процесів спалювання сумішей метан-біогаз, у струменево-нішевій системі стабілізації та горіння палива за допомогою CFD-моделювання, з ціллю визначення сприятливих геометричних та режимних параметрів. Це дозволить зробити аналіз впливу: геометричних параметрів СНС, різних співвідношень метану-біогаз на характеристики горіння та емісійні показники. Результати роботи будуть корисними при підготовці до проведення експериментальних досліджень на вогневому лабораторному стенді.

Виклад основного матеріалу. Розроблена CFD-модель з геометрією СНС (рис. 2) та підібраними граничними умовами і математичними моделями дозволяє наближено симулювати процес спалювання суміші в СНС, відображаючи основні характеристики цього процесу.



а б

Рис. 2. 3D модель розрахункової області струменево-нішевого стабілізатора полум'я та високотемпературної камери (а) – каркасне представлення з відображенням всіх кромок (б) – зафарбоване з відображенням всіх кромок

Для розрахунку було обрано неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Модель розглядалася в стаціонарному режимі (Steady) для зменшення витрат ресурсів і часу, необхідних для вирішення. В якості моделі турбулентності обрана Realizable k-e модель. Це дворівнева модель турбулентності, що дозволяє визначати як турбулентну довжину, так і часову шкалу шляхом розв'язання двох окремих транспортних рівнянь. Термін Realizable означає, що модель задовольняє певним математичним обмеженням напружень Рейнольдса, що узгоджується з фізикою турбулентних течій. Ця модель була ретельно протестована для широкого спектру потоків включаючи обертові однорідні зсувні потоки, вільні потоки, включаючи струмені і шари змішування, потоки в каналі і примежевомушарі, а також розділені потоки. У всіх цих випадках було підтверджено ефективність і доцільність її використання [6].

Теплофізичні характеристики кожного компоненту реакції були розраховані з використанням бази даних Fluent. В якості моделі горіння обрана модель Species Transport з урахуванням дифузії. Реакція є об'ємною, а взаємодії між турбулентністю та хімічними процесами в полум'ї моделюються за допомогою Eddy-Dissipation. Ця модель дозволяє наближено симулювати мікро-факельний турбулентний процес горіння попередньо неперемішаної суміші, що відбувається у пальниках СНС.

Емісія NO_x розраховувались за допомогою використання стандартної моделі термічного утворення NO_x. Утворення термічних оксидів азоту визначається набором хімічних реакцій, які залежать від температури і відомі як розширений механізм Зельдовича. Основні реакції, що керують утворенням термічних NO_x:

$$O+N_2 \rightleftharpoons NO+N, \quad N+O_2 \rightleftharpoons NO+O, \quad N+OH \rightleftharpoons NO+H \quad (1)$$

Виходячи з рівнянь (1) перші два рівняння – основні реакції, які регулюють утворення теплового NO_x з молекулярного азоту. Третя реакція сприяє утворенню теплового NO_x, особливо за умов, близьких до стехіометричних, і в паливозбагачених сумішах. З підвищенням температури кінетична енергія реагуючих молекул збільшується, що призводить до підвищення швидкості реакції. Зокрема, швидкість утворення термічних NO_x подвоюється при кожному збільшенні температури на 90 K вище 2200 K. Це експоненційне співвідношення характерне для багатьох хімічних реакцій, як описано рівнянням Арреніуса, де швидкість реакції експоненційно зростає з підвищенням температури [6].

В якості типу граничних умов на вході для повітря і палива, була обрана масова витрата (mass-flow-inlet), а на виході для продуктів згорання – тиск (pressure-outlet). Теплообмін з навколишнім середовищем не враховувався. Візуалізація була створена за допомогою інструменту для обробки результатів ANSYS-Fluent countours.

Для спрощення обчислень в якості палива обрано двокомпонентну суміш метану та вуглекислого газу.

В роботі проведено оцінку впливу складу пальної суміші на робочий процес горіння в СНС. Проведено чисельний розрахунок спочатку для чистого метану, а потім для сумішей в яких до CH_4 додається CO_2 (вміст CH_4 не змінюється). Об'ємний вміст CO_2 : 10%, 20%, 30%. Суміш з вмістом 30% можна розглядати як спалювання біогазу [2].

В табл. 1 наведені дані стосовно: паливної суміші, її витрати, а також долі кожного компоненту, теплотворна здатність сумішей еквівалентна.

На рис. 3 показано розподіл температур в СНС для різного вмісту діоксиду вуглецю в суміші з метаном і для чистого метану. Коефіцієнт надлишку повітря α=1,1, визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{V_П}{V_o \cdot V_Г}, \quad (2)$$

де $V_п$ – витрата повітря м^3/с, $V_г$ – витрата газу м^3/с, V_o – стехіометричний коефіцієнт повітря під час спалювання газу визначається за формулою:

$$V_o = \frac{1}{21}[0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + \\ +6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_6 - O_2], \quad (3)$$

Таблиця 1

Масова витрата паливної суміші, та доля кожного компоненту в ній

Суміш	Компоненти	Витрата, кг/с	Об'ємна доля компоненту	Масова доля компоненту
1. CH_4	CH_4	0.0023739	1	1
2. CH_4+CO_2	CH_4	0.0030974	0,9	0.7663981
	CO_2		0,1	0.2336019
3. CH_4+CO_2	CH_4	0.0040019	0,8	0.5931863
	CO_2		0,2	0.4068137
4. CH_4+CO_2	CH_4	0,0051647	0,7	0.4596272
	CO_2		0,3	0.5403728

Характеристики газового колектору: s/d = 3,5, d = 3,0 мм, де d – діаметр газорозподільчих отворів, s – крок, згідно рекомендацій [7].

CO_2 розбавляє паливно-повітряну суміш і знижує максимальну температуру в гарячих точках, де відбувається найінтенсивніше горіння, і водночас підвищує температуру в холодніших зонах, які зазвичай не досягають високих температур при горінні чистого метану. Також підвищується щільність палива, знижується довжина факелу. В усіх випадках горіння розпочинається безпосередньо в нішевій порожнині, що забезпечує стабілізацію факелу незалежно від складу суміші. Також забезпечує стабілізацію і виступає в ролі турбулізатора струменевий «екран» палива. При додаванні діоксиду вуглецю спостерігається зміщення горіння в над нішеву зону.

При вмісті CO_2 30% спостерігається погіршення сумішоутворення, модель горіння не стабільна, можливе затухання. Тобто не змінюючи геометрію забезпечити стабільне спалювання не вдається. При подальшому збільшенні його вмісту ситуація підсилюється.

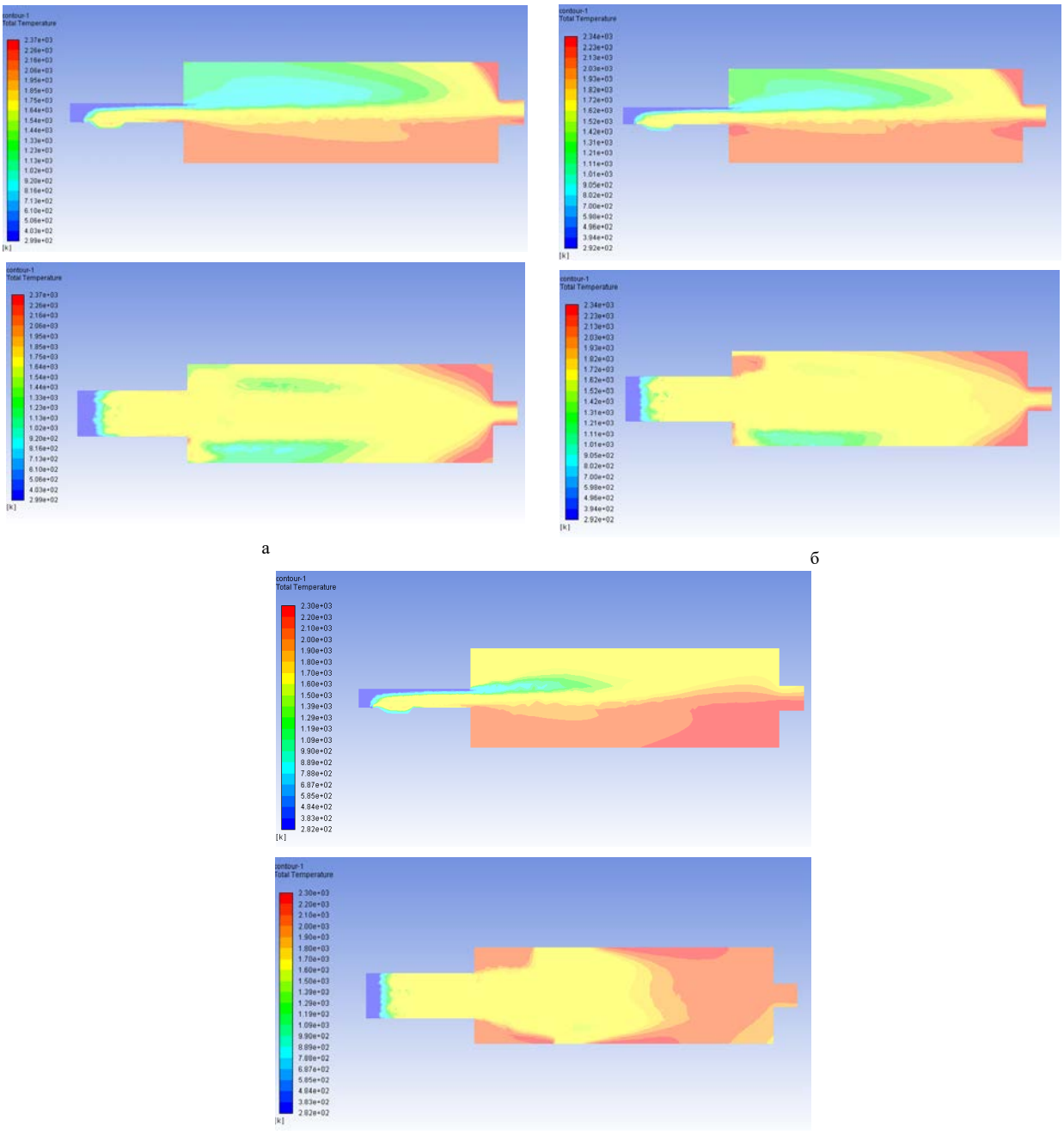


Рис. 3. Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному і горизонтальному осьових перетинах, для співвідношення компонентів за об'ємом метан/CO_2 а) 100/0%, б) 90%/10%, в) 80%/20%

На рис. 4 показано, зміну максимальної концентрації NO_x з додаванням CO_2. Згідно з [8], додавання CO_2 до метану термічно пригнічує пікові концентрації атомів О і радикалу ОН в результаті зниження максимальної температури горіння. Це сприяє зниженню NO_x, що підтверджується результатами розрахунків (табл. 2). Значення концентрації розраховується за формулою:

$$NO_ppm = \frac{NO_mole_fraction \times 10^6}{1 - H_2O_mole_fraction} \quad (4)$$

При додаванні 10% CO_2 викиди NO_x знизилися до 26%, а при 20% – до 34%. Результати також показали, що при подальшому збільшенні вмісту CO_2, продовжується зниження концентрації NO_x, хоча і не так інтенсивно, як при початковому додаванні.

Таблиця 2

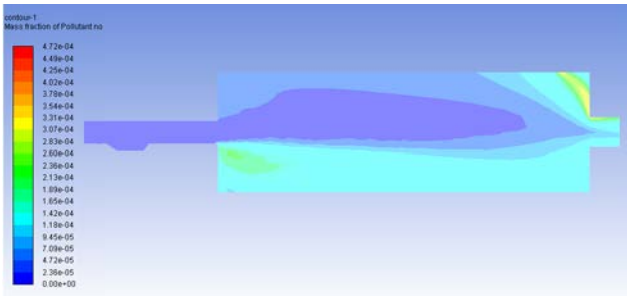
Залежність концентрації у вихідному патрубку від об'ємної долі CO_2

Об'ємна доля CO_2, 20%	Значення концентрації у вихідному патрубку, ppm
0	123,7
10	89,1

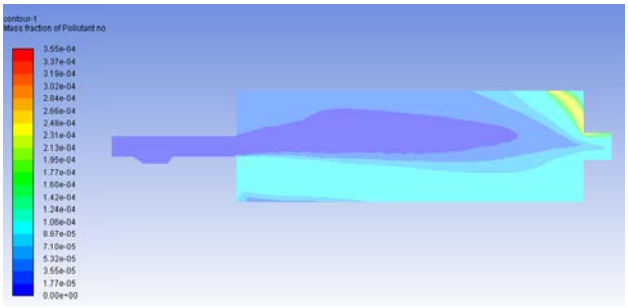
Також варто згадати факт збільшення концентрації CO_2 на виході пропорційно до збільшення його концентрації на вході. Враховуючи всі позитивні та негативні фактори, можна стверджувати, що існує певний діапазон вмісту CO_2, при якому суттєво знижується NO_x, спостерігається невелике зниження температури та збільшення викидів CO_2. Цей діапазон становить 10–20%.

Щоб спалювати чистий біогаз, для досягнення близької теплової потужності як для природного газу, використовувати пальниковий пристрій розроблений для другого не можна, оскільки потрібно подати більшу кількість біогазу за масою ніж природного газу. Це неможливо без значного збільшення тиску перед пальником. Збільшення швидкості витікання пального порушить оптимальне співвідношення швидкостей газ-повітря. Це змінить глибину проникнення струменів палива в потік повітря, що призведе до порушення режиму роботи пальникового пристрою і збільшить ймовірність зриву факела. Необхідно змінити геометрію пальника, а саме збільшити діаметр отворів для проходу біогазу.

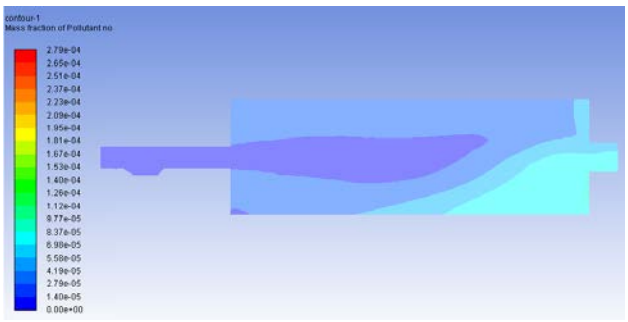
Важливо правильно вибрати відносний крок розташування газорозподільчих отворів (S/d). Згідно [7], для природного газу рекомендовані значення становлять 3,0...4,0. Відхилення за ці межі може значно погіршити процеси сумішоутворення в зоні стабілізації факела, що звужує



а



б

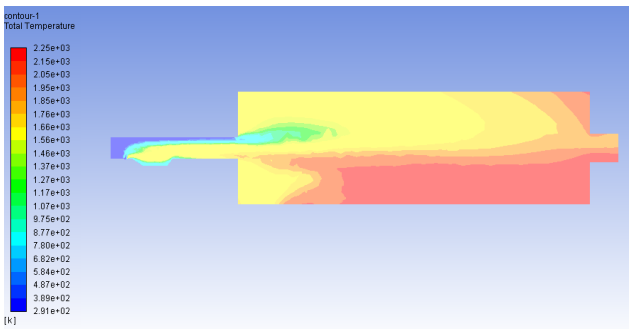


в

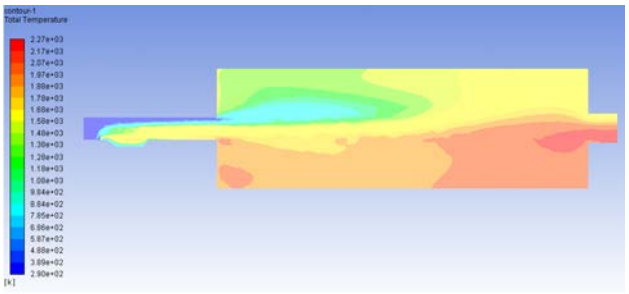
Рис. 4. Поле концентрації оксидів азоту в центральному перетині дослідної ділянки співвідношення компонентів за об'ємом метан/CO_2 а) 100/0%, б) 90%/10%, в) 80%/20%

діапазон стабільного горіння. Для менш калорійних газів також бажано дотримуватися цих меж, оскільки це забезпечує стабілізацію горіння і стехіометричну суміш в зоні його стабілізації. Було проведено розрахунки для відношень: S/d = 3 при d = 5,0, S/d = 3,2 при d = 4,0, S/d = 2,15 при d = 6,0. З точки зору забезпечення потужності, а також стабільного горіння, найкраще себе показав варіант S/d = 3,2 при d = 4,0 (рис. 6).

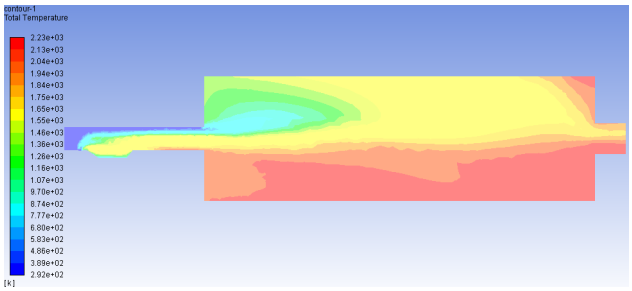
На рис.6 можна спостерігати, що незважаючи на забезпечення витрати біогазу яка відповідає такій же кількісті CH_4 (див. табл. 1) як і на рис. 3 а, досягти такої ж пікової температури не вдалося. Різниця склала близько 120°С. Проте середній розподіл температур в досліджуваній зоні є близьким. Також спостерігається зниження викидів NO_x, близько 40% (74 ppm).



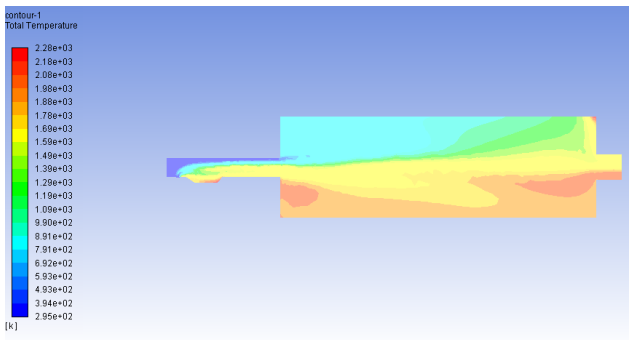
а



б



в



г

Рис. 5. Порівняння температурного поля продуктів згоряння суміші метан/CO_2 зі співвідношенні компонентів за об'ємом 70%/30%, при α = 1,1, в залежності від S/d і d: а) S/d = 3,2 при d = 4, б) S/d = 2,6 при d = 4 , в) S/d = 3 при d = 5, г) S/d = 2,15 при d = 6

Збільшення далекобійності струменів палива впливає на стабілізацію та горіння факелу. Крім горіння в нішевій порожнині, воно також відбувається в області над нішею і частково продовжується далі в потоці реагуючої суміші. Далекобійність палива визначається гідродинамічним параметром q, який є відношенням динамічних напорів палива та окисника.

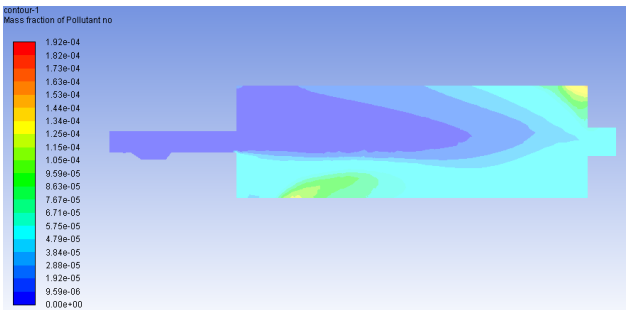


Рис. 6. Розподіл NO_x по осі дослідної ділянки при спалюванні суміші метан/CO_2 у співвідношенні 70% на 30%, при α = 1,1 і S/d = 3,2 при d = 4

$$q = \left(\rho_г \cdot W_г^2\right) / \left(\rho_п \cdot W_п^2\right), \qquad (5)$$

де $\rho_г$, $\rho_п$ – густина пального газу і повітря відповідно, $W_г$ і $W_п$ – швидкість газу і повітря.

У даній роботі для чистого метану значення гідродинамічного параметру q становить 11,877, тоді як для суміші 4 (табл. 1) при тій самій геометрії q = 23,3. При S/d = 3,2 та d = 4 значення q становить 16,3. Визначення закономірностей зміни далекобійності струменів альтернативних пальних газів є важливою практичною задачею при маштабуванні потужності стабілізаторних пальникових пристроїв.

Висновки

– Біогаз є перспективним паливом і може повністю або частково замінювати природний газ за умови заміни або реконструкції пальникового пристрою.

– Через схильність до зриву полум'я біогаз має менший діапазон регулювання пальникового пристрою порівняно з природним газом.

– При спалюванні біогазу (суміш 4 табл. 1) викиди оксидів азоту зменшуються близько 40%, в порівнянні з природним газом. Фіксується зниження пікового значення температури (понад 120°С). Також збільшується вміст CO_2 в продуктах спалювання.

– Збільшення вмісту CO_2 в паливних газах знижує максимальні температури факелу, що призводить до уповільнення процесів горіння.

– Використання СНС розглядається перспективним з точки зору вирішення проблеми стабілізації факелу, яка виникає внаслідок того що у біогазу нижча максимальна нормальна швидкість поширення полум'я – 15–25 см/с – у порівнянні з 38 см/с при горінні природного газу.

– Збільшення вмісту діоксиду вуглецю сприяє зниженню емісії NOx: найкращий ефект спостерігається при додаванні до 20% CO_2, після чого зниження від-

бувається менш інтенсивно. На кожні 10% доданого CO_2 зниження NOx становить приблизно 9%.

– Для забезпечення теплової потужності, близької до тієї, що досягається спалюванням чистого CH_4, потрібно збільшити масову витрату біогазу більше ніж удвічі. При цьому для ефективної реалізації такої витрати необхідно також змінити геометрію пальникового пристрою. Найкращий результат показав варіант з відношенням S/d=3,2 при d=4.

– Хоча витрата біогазу на рис. 5 забезпечує ту ж витрату CH_4, що і на рис. 3а, температура по всій дослідній ділянці знизилася (не більше 140°C), як і викиди NO_x приблизно на 40%. Це зниження пов'язане з значною кількістю інертного компонента CO_2, який розбавляє паливо та знижують пікову температуру горіння. Зменшення температури сприяє зниженню швидкості утворення NO_x, оскільки цей процес сильно залежить від високих температур.

Список літератури:

1. B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozhavendhan, J. Iyyappan, Retraction notice to “Biogas production -A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, October 2018, Pages 1229.

2. Л. А. Боднар, Д. І. Денесяк, К. О. Іщенко, і А. С. Лукьянец, Особливості синтезу системи виробництва і спалювання біогазу на спиртзаводі, *СучТехнБудів*, вип. 25, вип. 2, с. 145–151, Лют 2019.

3. Rawan Hakawati, Beatrice M. Smyth, Geoffrey McCullough, Fabio DeRosa, David Rooney, “What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?”, Applied Energy, Volume 206, 15 November 2017, Pages 1076–1087.

4. Antonio Mariani, Mario Minale, Andrea Unich, «Use of biogas containing CH4, H2 and C02 in controlled auto-ignition engines to reduce NOx emissions», Fuel, Volume 301, 1 October 2021, 120925.

5. Абдулін М. З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2018. – Том 29 (68), № 1(2). – С. 55–60.

6. Fluent, A. N. S. Y. S. "Ansys fluent theory guide." *Ansys Inc., USA* 15317 (2011): 724–746.

7. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв : автореф. дис. ... канд. технн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. – Київ, 2016. – 28 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17858’

8. Jahangirian S., Engeda A., Wichman I.S. Thermal and Chemical Structure of Biogas Counterflow Diffusion Flames // Energy and Fuels. – 2009. – Vol. 23. – P. 5312–5321.

Dulskyi A.I., Siryi O.A. CFD MODELING OF THE COMBUSTION PROCESS OF METHANE-BIOGAS MIXTURE IN A JET-NICHE FLAME STABILIZER

The use of biogas in energy production offers numerous advantages, including the ability to utilize renewable energy sources. This becomes increasingly important in the context of global efforts to reduce dependence on fossil fuels, especially against the backdrop of growing demand for energy resources. However, the high CO_2 content in biogas poses certain challenges for the combustion process, among which one of the most significant is the reduction in the normal flame propagation speed, which in biogas is only 15–25 cm/s, negatively affecting flame stabilization. This makes research in the field of biogas combustion promising, as it contributes to the development of technologies that can ensure more efficient use of this type of fuel in energy installations.

The article is devoted to modeling the combustion process of a methane-biogas mixture in a jet-niche combustion and stabilization system (JNS). Modern modeling software was used to create the CFD model. The article reveals the impact of JNS geometric and operational parameters on the combustion process with different methane-CO2 component ratios.

Specifically, it was found that the addition of 30% CO2 to methane significantly changes the hydrodynamic parameter q, increasing it from 11.877 to 23.3 with an unchanged stabilizer geometry. It was determined that this also leads to a decrease in peak temperature (up to 140°C), which is an important factor in reducing the emissions of harmful substances such as NOx. It was established that the reduction in NOx emissions when adding 30% CO2 is approximately 40% compared to pure methane, which is a significant achievement in terms of environmental safety.

The article also highlights the need to increase biogas consumption to achieve thermal power equivalent to that provided by natural gas combustion, and discusses the challenges that arise from this, providing recommendations for their resolution.

Key words: *Biogas, methane-CO_2 mixture, CFD model, jet-niche system, temperature distribution.*