

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Кваліфікаційна праця  
на правах рукопису

ТИМОЩЕНКО ОЛЕКСАНДРА БОРИСІВНА

УДК 536.24:533


ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ЗАСАД СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В  
МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ МАЛОЇ  
ПОТУЖНОСТІ

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика  
144 - Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 - О.Б. Тимощенко

Науковий керівник: Фіалко Наталія Михайлівна, доктор технічних наук,  
професор, член-кореспондент НАН України



Київ 2020

*М. В. Тетрова*

## АНОТАЦІЯ

**Тимошенко О.Б.** Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю – 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 - Теплоенергетика). – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, 2020.

Пальникові пристрої відносно малої потужності широко застосовуються в енергетичному обладнанні різного призначення. Їх використання є вельми ефективним для вогнетехнічних об'єктів не лише порівняно невеликої, але й різної теплової продуктивності за умов, коли висуваються високі вимоги до рівномірності теплопідводу по вогневому простору.

Для зазначених ситуацій доцільним є використання мікрофакельних пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я. Їх більш висока ефективність у порівнянні з традиційними аналогами, в яких застосовуються плоскі стабілізатори полум'я, зумовлена, головним чином, більшою інтенсивністю їхніх робочих процесів.

Практично важливим є також те, що мікрофакельні пальники з циліндричними стабілізаторами полум'я прості у виготовленні, завдяки особливостям конфігурації порівняно легко інтегруються у конструкцію енергетичного обладнання, характеризуються низькою металоємністю, легкістю проведення ремонтних робіт тощо.

Потреби розвитку технологій спалювання палива із застосуванням пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я зумовлюють необхідність їх поглиблених теплофізичних досліджень. Широке застосування цих технологій стримується значною мірою через практичну відсутність таких досліджень. Вказане зумовлює актуальність цієї роботи.

Відповідно до вищевикладеного мета роботи полягає у науково-технічному обґрунтуванні технології спалювання газоподібного палива в мікрофакельних пальниках малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я при подачі палива проникненням в зносячий потік окиснювача й розробленні на цій основі технічних рішень та рекомендацій щодо застосування різних модифікацій таких пальників.

Для досягнення вказаної мети вирішенню підлягали такі завдання:

1. Виконати порівняльний аналіз основних особливостей перебігу робочих процесів мікрофакельних пальників з гладкими циліндричними і плоскими стабілізаторами полум'я.

2. Дослідити закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача, вигорання палива та формування температурних полів в зоні горіння для різних модифікацій мікрофакельних пальників малої потужності – з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я, та при застосуванні кільцевих нішових порожнин і турбулізаторів потоку.

3. Для пальникових пристроїв з гладкими стабілізаторами полум'я виявити закономірності зриву горіння та виконати аналіз можливості регулювання процесів сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника.

4. На основі досліджень процесів переносу в пальникових пристроях з кільцевими нішовими порожнинами визначити раціональні конструктивні параметри даної модифікації пальників малої потужності.

5. Виконати зіставлення основних характеристик робочих процесів у пальниках малої потужності за наявності і відсутності турбулізаторів потоку, встановлених на зривних кромках стабілізаторів полум'я.

В дисертації висвітлюються особливості методики проведення досліджень. Розглядаються методичні аспекти комп'ютерного моделювання досліджуваної фізичної ситуації.

У роботі було виконано дослідження з верифікації моделей турбулентного переносу. Вибір моделі, найбільш адекватної розглянутій фізичній ситуації,

базувався на зіставленні результатів проведених експериментів та комп'ютерного моделювання. При цьому розглядалися два підходи до моделювання турбулентних течій – RANS і DDES.

Згідно з отриманими даними найменші відносні відхилення результатів експериментальних і розрахункових досліджень мають місце при використанні SST –  $k-\omega$  моделі турбулентності в разі DDES підходу і RNG  $k-\varepsilon$  моделі – в разі RANS підходу.

Достовірність результатів комп'ютерного моделювання базувалася на зіставленні даних виконаних експериментальних і розрахункових досліджень, а також на порівнянні з розв'язками, одержаними методом прямого чисельного моделювання (DNS). Обґрунтованість наукових положень і висновків, які захищаються, підтверджується також досвідом впровадження розроблених пальникових пристроїв.

Щодо експериментальних досліджень робочих процесів пальникових пристроїв, то вони виконувалися на вогневому стенді, конструкція якого дозволяє проводити швидку заміну досліджуваних модулів.

В роботі були виконані дослідження, присвячені вивченню робочих процесів мікрофакельних пальникових пристроїв з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. На першому етапі досліджень проведено порівняльний аналіз закономірностей течії, сумішоутворення, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння при використанні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я.

Згідно з отриманими даними, в ситуаціях, що зіставляються, помітно відрізняються характеристики течії і сумішоутворення палива і окиснювача. У пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я в порівнянні з плоским: - довжина зони зворотних токів в його закормовій області в 1,8 рази менша, а значення модуля максимальної швидкості в 1,6 рази вища; - турбулізація потоку в ближньому сліді за стабілізатором є більш значною (максимальні значення інтенсивності турбулентності на осі сліду приблизно на 20% вищі); - втрати тиску в пальниковому пристрої нижчі на 12,5%;- швидкість процесу

сумішоутворення по довжині пальникового пристрою є значно вищою.

Показано також, що у разі пальникового пристрою з циліндричними стабілізаторами полум'я нерівномірність поля температур в поперечних перерізах факела є менш значною, ніж для пальникових пристроїв з плоскими стабілізаторами полум'я, по всій довжині факела. Крім того процес вигорання палива відбувається помітно інтенсивніше.

На основі отриманих даних зроблено висновок про те, що пальникові пристрої з циліндричними стабілізаторами полум'я в порівнянні з пальниковими пристроями з плоскими стабілізаторами полум'я характеризуються значно більшою турбулізацією потоку в закормовій області стабілізатора і суттєво вищою інтенсивністю протікання процесів сумішоутворення та вигорання палива.

В роботі виконані експериментальні дослідження стійкості горіння для пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами. Показано, що стабілізація полум'я на бідному зриві покращується зі зменшенням відстані  $S/d$  між газоподавальними отворами, а на багатому зриві - зі збільшенням відстані  $L_1$  між зривною кромкою стабілізатора і газоподавальними отворами. Щодо пускових характеристик розглянутих пальників, то вони корелюються певним чином зі зривними характеристиками на бідному зриві і погіршуються зі збільшенням швидкості повітряного потоку і величини  $S/d$ .

На основі CFD моделювання для типоряду пальникових пристроїв потужністю 30-200 кВт з гладкими стабілізаторами полум'я були визначені їх раціональні конструктивні і режимні параметри.

За результатами порівняльного аналізу картини течії для даного типоряду пальникових пристроїв встановлено, що зі зростанням потужності пальникового пристрою збільшуються протяжності зон зворотних токів; зменшуються абсолютні значення максимальних швидкостей в цих зонах і спостерігається тенденція до підвищення рівня турбулізації потоку на деякій відстані від стабілізатора полум'я.

Показано, що з підвищенням потужності пальника все більша частина процесу сумішоутворення виноситься за межі власне пальника в топковий простір.

Певну увагу в роботі було приділено аналізу можливості регулювання

процесу сумішоутворення і відповідно можливості створення факела полум'я різної довжини за допомогою зменшення відстані  $L_1^*$  від місця виходу газу з отворів до устя пальника.

Для розглянутого типоряду пальникових пристроїв були визначені умови, за яких до устя пальника надходить суміш високого ступеня змішування газу з повітрям, так що практично весь поперечний переріз пальника, що проходить через зривну кромку стабілізатора, зайнято сумішшю, що відповідає концентраційним межам запалення. Встановлено, що величина  $L_1^*$ , при якій реалізується такий ступінь змішаності в усті пальника, виявляється різною для пальників різної потужності і збільшується з ростом останньої. Однак при цьому практично однаковим для різних пальників типоряду виявляється відношення відстані  $L_1^*$  до діаметру газоподавальних отворів.

В роботі виконано комплекс досліджень, які стосуються модифікації типоряду пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я з кільцевими прямокутними нішами.

З метою вибору раціональних конструктивних параметрів даної модифікації пальникових пристроїв проведено дослідження процесів переносу в цих пристроях при варіюванні в певних межах їх основних геометричних характеристик, таких як розміри ніші, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора, крок між газоподавальними отворами та ін. За результатами цих досліджень визначено рекомендовані значення основних конструктивних параметрів розглянутого типоряду пальників.

Одержано дані, які свідчать про те, що наявність ніші призводить до помітного підвищення інтенсивності турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора полум'я. При цьому втрати тиску в пальниковому пристрої, пов'язані з наявністю кільцевої ніші, є порівняно незначними.

Виконано порівняльний аналіз картини сумішоутворення для модифікації типоряду пальникових пристроїв з кільцевими нішами, за результатами якого показано, що з підвищенням потужності пальникового пристрою інтенсивність сумішоутворення в закормовій області стабілізатора знижується. Однак за

наявності нішових порожнин дане зниження є не настільки значним, як у пальниках без нішових порожнин.

Наводяться результати досліджень картини горіння в пальниках з кільцевими нішами. Показано, що воно починається у власне нішовій порожнині, поширюється уздовж зовнішньої поверхні стабілізатора і далі триває в його закормовій області. За відсутності кільцевої ніші початок горіння відповідає зривній кромці стабілізатора. Такий характер процесу горіння в ситуаціях, що зіставляються, зумовлює вищу інтенсивність вигорання палива і трохи більшу рівномірність поля температур в поперечних перерізах факела для пальників з кільцевими прямокутними нішами.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що наявність нішових порожнин зумовлює покращення стабілізації полум'я на бідному зриві, що є важливим для експлуатації пальників на пускових режимах. При цьому дане покращення є тим значніше, чим більше потужність пальникового пристрою з розглянутого типоряду.

Виконано дослідження, присвячені вивченню робочих процесів в пальникових пристроях з турбулізаторами потоку, встановленими на зривній кромці стабілізатора полум'я.

Результати моделювання показали, що за наявності пластинчастих турбулізаторів спостерігається суттєво вищий рівень пульсацій швидкості в значній частині потоку за стабілізатором полум'я. При цьому підвищення інтенсивності турбулентності є найбільш значним поблизу торця стабілізатора.

Одержано дані, згідно з якими при встановленні турбулізаторів потоку втрати тиску в пальникових пристроях збільшуються. При цьому дане збільшення є тим значнішим, чим менше потужність пальникового пристрою. Показано також, що ці втрати залишаються вельми невеликими, що характерно для пальників прямого типу.

За результатами порівняльного аналізу картини сумішоутворення для типоряду пальників з турбулізаторами потоку різної потужності показано, що зі зростанням потужності пальникового пристрою інтенсивність змішування палива і

повітря знижується. Однак, за наявності турбулізаторів потоку це зниження є не настільки значним, як у пальниках без турбулізаторів.

Згідно з даними дослідження процесу горіння за наявності і відсутності турбулізаторів потоку встановлено, що в першому випадку, зважаючи на суттєве збільшення периметра підпалювання, горіння починається на значній частині перерізу, що відповідає зривній кромці стабілізатора. За відсутності ж турбулізатора початок горіння відповідає лише площі торцевої поверхні стабілізатора. Це поряд з суттєвою турбулізацією потоку призводить до підвищення інтенсивності вигорання палива і помітного зниження нерівномірності поля температур в поперечних перерізах факела при встановленні турбулізаторів потоку на зривній кромці стабілізаторів полум'я.

На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо застосування різних модифікацій типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я.

Результати виконаних досліджень впроваджено в НВК «Струменево-нішова технологія» на сушарках фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу НІСТУ, Е-1,0-0, 9ГН-2 та інших.

Серед наукових результатів дисертації, одержаних вперше, можна відзначити такі.

1. Вперше для мікрофакельних газових пальників малої потужності одержано дані порівняльного аналізу характеристик течії, сумішоутворення, теплопереносу та вигорання палива при застосуванні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я. Встановлено, що при застосуванні циліндричних стабілізаторів забезпечується підвищення рівня турбулізації потоку, швидкості процесу сумішоутворення, зменшення нерівномірності поля температур у поперечних перерізах факела, інтенсифікація процесу вигорання палива та зменшення втрат тиску у пальнику.

2. Вперше досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з гладкими



циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт. Показано, що для забезпечення у вказаних пальниках так званого внутрішнього сумішоутворення (коли в усті пальника має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розташовувати на відстані від зривної кромки стабілізатора, що дорівнює приблизно 35 діаметрам цих отворів.

3. Вперше для модифікації мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях виявлено ефекти впливу даних порожнин на робочі процеси в пальниках та обґрунтовано вибір їх просторових характеристик.

4. Вперше встановлено закономірності аеродинаміки, змішування палива і окиснювача, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках циліндричних стабілізаторів полум'я.

Основні наукові положення, які повністю розкривають зміст і результати дисертації, викладені в 34 друкованих працях, зокрема, у 12 статтях, що входять до наукометричних баз даних, 4 статтях у наукових фахових виданнях України та 17 публікаціях у збірниках наукових праць за матеріалами конференцій та одному патенті України.

**Ключові слова:** спалювання, вогнетехнічний об'єкт, технологія спалювання, мікрофакельні пальники, циліндричні стабілізатори полум'я, нішові порожнини, турбулізатори потоку.

***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н. & Тимощенко А.Б. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т.3, №8(69). С. 40-44. (Внесок

здобувача: участь у постановці задачі та аналізі даних математичного моделювання).

2. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н. & Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.5. С. 136-142. (Внесок здобувача: участь у проведенні обчислюваних експериментів, обробці та аналізі результатів).
3. Фіалко Н.М., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Компьютерное моделирование температурных полей продуктов горения в цилиндрических горелочных устройствах стабилизаторного типа. *Международный научный журнал «Интернаука»*. 2019. Том 1, №17 (79). С.49-53. (Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та підготовка матеріалів до публікації).
4. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н. & Тимощенко А.Б. Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.6. С. 114-121. (Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та проведенні обчислюваних експериментів).
5. Фіалко Н.М., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Іваненко Г.В., Юрчук В.Л., Ганжа М.В., Дончак М.І., Абдулін М.З. & Тимощенко О.Б. Особенности аэродинамики пальниковых устройств с цилиндрическими стабилизаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2016. №252. С.52-61. (Внесок здобувача: участь у проведенні комплексу обчислюваних експериментів і аналізі отриманих даних).
6. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Ганжа М.В., Реграги А. & Тимощенко О.Б. Аналіз можливостей

- регулювання процесу сумішоутворення в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2020. №12 (92). С.49-53. (Внесок здобувача: участь у розробці та реалізації методики дослідження, обробці та узагальненні результатів).
7. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Юрчук В.Л., Г.В. Іваненко, А. В. Кліщ & Тимощенко О.Б. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т.27, № 3. С. 131-135. (Внесок здобувача: участь у комп'ютерному моделюванні, аналізі результатів та підготовка матеріалів до публікації).
8. Фіалко Н.М., Малецькая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Закономерности выгорания топлива в микрофакельных горелках с турбулизаторами потока. *Международный научный журнал "Интернаука"*. 2019. Том 1, №17 (79). С. 49-53. (Внесок здобувача: участь у постановці задачі та аналізі результатів математичного моделювання).
9. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Сірій О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Кліщ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я. & Тимощенко О.Б. Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. *Науковий вісник НЛТУ*. 2018. Т. 28, №3. С.97-100. (Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень та обробці і аналізі результатів).
10. Фіалко Н.М., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Дашковська І.Л., Кліщ А.В., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко О.Б. Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності прямокутних нішових порожнин. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2020. № 12 (92). С. 43-46. (Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та підготовка матеріалів до публікації).
11. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С. & Тимощенко А.Б. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа.

- Технологические системы*. 2012. № 1. С. 52-57. (Внесок здобувача: участь у проведенні обчислюваних експериментів та аналізі результатів досліджень).
12. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Алешко С.О., Полозенко Н.П., Стрижеус С.Н. & Тимощенко О.Б. Сравнительный анализ характеристик течения в горелках с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени в изотермических условиях и при горении топлива. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2016. Вип. 242. С. 33-40. (Внесок здобувача: участь у комп'ютерному моделюванні, обробці та аналізі результатів).
13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В. & Тимощенко А.Б. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. *Промышленная теплотехника*. 2012. №1. С. 72-76. (Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та проведенні обчислювальних експериментів).
14. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С. & Тимощенко А.Б. Аналіз ефективності систем охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв з направляючими дефлекторами. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація*. 2013. №758. С. 46-51. (Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та аналізі даних математичного моделювання).
15. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., & Тимощенко А.Б. Тепломассообменные процессы в цилиндрических горелочных устройствах с нишевыми полостями. *Промышленная теплотехника*. 2016. Т.38, №6. С.3-11. (Внесок здобувача: участь у постановці задачі, проведенні комплексу обчислюваних експериментів та аналізі отриманих результатів).
16. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н. О., Майсон Н.В. & Тимощенко А.Б. Особенности течения в цилиндрических горелочных устройствах с пластинчатыми турбулизаторами потока. *Промышленная теплотехника*. 2017.

№1. С.5-12. (Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, комп'ютерному моделюванні та обробці і аналізі результатів).

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

17. Фиалко Н.М., Давыденко Б.В. & Тимощенко А.Б. Численное моделирование взаимодействия вертикально направленной струи с горизонтальным газовым потоком. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVI международной конференции* (г. Севастополь, 6 – 10 июня 2006г.), Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2006. С.120-122.
18. Абдулин М.З., Фиалко Н.М., Меранова Н.О. & Тимощенко А.Б. Характеристики устойчивости факела в микрофакельных горелочных устройствах. *Modern science: problems and innovations: II International scientific and practical conference* (Stockholm, 3-5 May 2020). Stockholm, Sweden. 2020. P.265-268.
19. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін. М.З. Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О. & Тимощенко О.Б. Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов*, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 114-117.
20. Фиалко Н.М., Меранова Н.О., Майсон М.В., Иваненко Г.В., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Математическое моделирование течения в прямоугольных кольцевых нишах цилиндрических стабилизаторных горелочных устройств. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов*, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 110-114.
21. Abdulin M., Fialko N., Meranova N., & Tymoshchenko O. Temperature regimes of circulating flows in the eastern regions of flame stabilizers. *Scientific achievements of modern society: 7<sup>th</sup> International scientific and practical conference* (Liverpool, 4-6 march 2020). Liverpool, United Kingdom. 2020. P.16-20.

22. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Характеристики течения в горелочном устройстве с угловыми турбулизаторами потока. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 99-101.*
23. Фіалко Н.М., Іваненко Г.В., Майсон Н.В., Полозенко Н.П., Юрчук В.Л., Клищ А.В., Рокитько К.В., Дончак М.И. & Тимощенко А.Б. Температурные поля в зоне горения для горелочных устройств с плоскими и цилиндрическими стабилизаторами пламени. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.74-78.*
24. Фіалко Н.М., Малецька О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов горения в микрофакельных горелочных устройствах. *Актуальные проблемы современной науки: XLV Международная научно-практическая конференция (Харьков–Вена–Берлин–Астана, 28 ноября 2019 г.). 2019. С. 22-23.*
25. Бутовський Л.С., Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Зарицький О.А., Шеренковський Ю.В. & Тимощенко О.Б. Експериментальні дослідження структури течії у пальникових пристроях стабілізаторного типу з застосуванням кутових турбулізаторів потоку. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXII международной конференции (г. Ялта, 8-12 июня 2012 г.), Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2012. С. 141-145.*
26. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С. & Тимощенко О.Б. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.*

27. Фиалко Н.М., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Тепловое состояние зоны горения цилиндрических микрофакельных горелочных устройств. *Актуальные проблемы современной науки: XLV Международная научно-практическая конференция (Харьков–Вена–Берлин–Астана, 28 ноября 2019 г.)*. 2019. С. 20-21.
28. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Альошко С.А., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Ольховская Н.Н., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Моделирование структуры течения и смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа в условиях асимметричной подачи топлива. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии*. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2019. С.62-66.
29. Абдулин М.З., Фиалко Н.М., Серый А.А., Милко Е.И., Озеров А.А., Ольховская Н.Н., Швецова Л.А. & Тимощенко А.Б. Устойчивость факела в цилиндрических горелочных устройствах стабилизаторного типа. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии*. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.79-82.
30. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Юрчук В.Л., Новаковский М.А., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Сравнительный анализ эффективности систем охлаждения стабилизаторных горелочных устройств при различной нагрузке котлоагрегата. *Проблемы промышленной теплотехники: материалы VIII международной конференции (г. Киев, 8-11 октября 2013 г.)*. Киев. (Электронное издание).
31. Фиалко Н.М., Меранова Н.О., Алешко С.А., Иваненко Г.В., Майсон Н.В., Хмиль Д.П. & Тимощенко А.Б. Характеристики течения топлива и окислителя в горелках стабилизаторного типа с нишевыми полостями. *Проблеми теплофізики та теплоенергетики: матеріали X міжнародної конференції (м. Київ, 23–25 травня 2017р.)*. Київ. 2017. С. 30.
32. Прокопов В.Г., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Кутняк О.М. & Тимощенко О.Б. Математичне моделювання

аеродинаміки та теплообміну в системах охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXI международной конференции* (г. Ялта, 7-11 июня 2011 г.). Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2011. С. 177-179.

33. Фіалко Н. М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Рокитько К.В., Полозенко Н.П., Бутовський Л.С. & Тимощенко О.Б. Закономірності тепловіддачі на внутрішній поверхні стабілізаторів полум'я при застосуванні спеціальних систем охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXII международной конференции* (г. Ялта, 8-12 июня 2012 г.). Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2012. С. 159-162.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

*Патенти:*

34. Патент на корисну модель № 143503, Україна. Пальниковий пристрій. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Куник А.А. // опубл. 27.07.2020.

## SUMMARY

**Timoshchenko O.B.** Development of thermophysical basis of gas combustion in microjet burner devices of low power. - Manuscript qualification scientific work.

The thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty - 05.14.06 "Engineering Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering" (144 - Heat Power Engineering). - Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2020.

Relatively low power burner devices are widely used in power equipment for various purposes. Their use is very effective for fire engineering facilities not only



relatively small, but also of different thermal performance in conditions when high demands are placed on the uniformity of heat supply over the firing space.

For these situations, it is advisable to use microjet burner devices with cylindrical flame stabilizers. Their higher efficiency compared to traditional analogues, in which flat flame stabilizers are used, is mainly due to the greater intensity of their work processes.

It is practically important that microjet burners with cylindrical flame stabilizers are simple to manufacture, due to the configuration features they are relatively easy to integrate into the design of power equipment, are characterized by low metal consumption, ease of repair work, etc.

Microflame burner devices based on the use of cylindrical elements are widely used in the energy industry - modular elements of ABB combustion chambers, various tube-type burners based on cylindrical channels with expansion, etc. Heat and mass transfer in such burner devices, characterized by a high degree of diffusion of combustion, are devoted to the works of Khristich V.A., Lyubchik M., Varlamov G. B., Marchenko S., Mikulin A., etc.

The lack of the necessary completeness of studies of the thermophysical aspects of the technology of burning fuel in low power burners with cylindrical flame stabilizers determines the relevance of this work.

In accordance with the foregoing, the aim of the work is to provide a scientific and technical substantiation for the technology of burning gaseous fuel in low-power microjet burners with cylindrical flame stabilizers when fuel is introduced into the blow-off stream of an oxidizing agent and developing on this basis technical solutions and recommendations for the use of various modifications of such burners.

To achieve this aim, the following tasks were subject to study:

1. To carry out a comparative analysis of the main features of the flow of microjet burners with smooth cylindrical and flat flame stabilizers.

2. To study the patterns of flow, mixture formation of fuel and oxidizer, fuel burnout and the formation of temperature fields in the combustion zone for various modifications of microjet burners of low power - with smooth cylindrical flame stabilizers, and with the use of annular niche cavities and flow turbulators.

3. For burner devices with smooth flame stabilizers to identify the patterns of burning failure and to analyze the possibility of regulating the processes of mixture formation of fuel and oxidizer by changing the distance from the gas supply holes to the outfall of the burner.

4. Based on studies of transfer processes in burner devices with annular niche cavities, to determine the rational design parameters of this modification of low-power burners.

5. To compare of the main characteristics of the working processes in low-power burners in the presence and absence of flow turbulators installed on the stall edges of flame stabilizers.

The dissertation highlights the features of the research methodology. The methodological aspects of computer modeling of the studied physical situation are considered.

A study on the verification of turbulent transfer models was carried out in the work. The choice of the model that is most appropriate for the physical situation under consideration is based on a comparison of the results of experiments and computer modeling. In this case, two approaches to modeling turbulent flows — RANS and DDES — were considered.

According to the data obtained, the smallest relative deviations of the results of experimental and computational studies occur when using the SST -  $k-\omega$  turbulence model in the DDES approach and the RNG  $k-\epsilon$  model in the case of the RANS approach.

The reliability of the results of computer modeling was based on a comparison of the data of experimental and computational studies, as well as on comparison with solutions obtained by direct numerical simulation (DNS). The validity of scientific provisions and conclusions that are protected is also confirmed by the experience of implementing the developed burner devices.

As for the experimental studies of the working processes of the burner devices, they were carried out on a fire stand, the design of which allows for quick replacement of the studied modules.

The researches devoted to the study of the working processes of microjet burner

devices with smooth cylindrical flame stabilizers were carried out in the work. At the first stage of research, a comparative analysis of the patterns of flow, mixture formation, fuel burnup, and the formation of temperature fields of the combustion zone using cylindrical and flat flame stabilizers was performed.

According to the data obtained, the characteristics of the flow and mixture formation of fuel and oxidizer noticeably differ in comparable situations. In a burner with a cylindrical flame stabilizer compared to a flat one: - the length of the reverse current zone in its feed zone is 1.8 times less, and the maximum speed modulus is 1.6 times higher; - turbulization of the flow in the near wake behind the stabilizer is more significant (the maximum values of the turbulence intensity on the wake axis are about 20% higher); - pressure loss in burner devices is lower by 12.5%; - the speed of the process of mixture formation along the length of the burner is much higher.

It was also shown that in the case of a burner with cylindrical flame stabilizers, the non-uniformity of the temperature field in the cross sections of the flame is less significant than for burners with flat flame stabilizers along the entire length of the flame. In addition, the process of fuel burnout is much more intense.

Based on the data obtained, it was concluded that burner devices with cylindrical flame stabilizers, in comparison with burner devices with flat flame stabilizers, are characterized by significantly greater turbulence of the flow in the feed zone of the stabilizer and a significantly higher rate of mixture formation and fuel burnout.

In the work, experimental studies of combustion stability for burner devices with cylindrical stabilizers are performed. It is shown that flame stabilization at a poor flameout improves with a decrease in the  $S/d$  distance between the gas supply holes, and at a rich flameout, with an increase in the distance  $L_1$  between the flameout edge of the stabilizer and the gas supply holes. As for the starting characteristics of the considered burners, they are correlated in a certain way with the flameout characteristics at a poor flameout and worsen with increasing air velocity and value of  $S/d$ .

Based on CFD modeling, a rational design and operating parameters were determined for a series of burners with a power of 30-200 kW with smooth flame stabilizers.

According to the results of a comparative analysis of the flow pattern for this series of burner devices, it was found that with an increase in the power of the burner device, the lengths of the reverse flows zones increase; the absolute values of the maximum velocities in these zones decrease and a tendency to increase the level of flow turbulization at a certain distance from the flame stabilizer is observed.

It is shown that with an increase in the burner power, an increasing part of the mixture formation process is taken out beyond the limits of the burner itself into the furnace space.

Some attention in the work was paid to the analysis of the possibility of regulating the process of mixture formation and, accordingly, the possibility of creating a flame torch of various lengths by reducing the distance  $L_1^*$  from the place of gas exit from the holes to the mouth of the burner.

For the considered series of burner devices conditions were determined under which a mixture of a high degree of mixing of gas with air arrives at the mouth of the burner, so that almost the entire cross section of the burner passing through the flame out edge of the stabilizer is occupied by a mixture that meets the concentration limits of ignition. It was found that the value  $L_1^*$ , at which such a degree of mixing at the mouth of the burner is realized, turns out to be different for burners of different  $s$  and increases with the growth of the latter. However, in this case, the ratio of the distance  $L_1^*$  to the diameter of the gas supply holes turns out to be almost identical for different burners of the series.

A set of studies was carried out in the work for the modification of a series of burner devices with cylindrical flame stabilizers with annular rectangular niches was carried out in the work.

In order to choose rational structural parameters of this modification of burner devices, the research the transfer processes in these devices with varying within certain limits their basic geometric characteristics, such as the size of the niche, its location relative to the stall edge of the stabilizer, the pitch between the gas supply holes, etc. carried out. According to the results of these studies recommended values of the main design parameters of the considered burner series are determined.

The data obtained indicate that the presence of a niche leads to a noticeable increase in the intensity of turbulence near the outer surface of the flame stabilizer. Moreover, the pressure loss in the burner associated with the presence of an annular niche is relatively insignificant.

A comparative analysis of the mixture formation pattern for modifying the series of burner devices with annular niches was carried out, the results of which show that, with an increase in the power of the burner device, the mixture formation intensity in the feed zone of the stabilizer decreases. However, in the presence of niche cavities, this decrease is not as significant as in burners without niche cavities.

The results of studies of the combustion pattern in burners with annular niches are presented. The results of studies of the combustion pattern in burners with ring niches are presented. It is shown that it begins in the niche cavity itself, propagates along the outer surface of the stabilizer, and then continues in its feeding area. In the absence of an annular niche, the beginning of combustion corresponds to the flame out edge of the stabilizer. This nature of the combustion process in comparable situations results in a higher intensity of fuel burnup and a slightly more uniform temperature field in the cross sections of the flame for burners with annular rectangular niches.

According to the results of the studies, it was found that the presence of niche cavities leads to improved stabilization of the flame at a poor flame out, which is important for the operation of burners in starting conditions. Moreover, this improvement is more significant, the higher the power of the burner device of the considered series.

Studies have been performed on the study of working processes in burner devices with flow turbulators mounted on the flame out edge of the flame stabilizer.

The simulation results showed that in the presence of plate turbulators, a significantly higher level of velocity pulsations is observed in a significant part of the flow behind the flame stabilizer. Moreover, the increase in turbulence intensity is most significant near the end of the stabilizer.

The data is obtained, according to which, when installing flow turbulators, pressure losses in burner devices increase. Moreover, this increase is all the more significant, the lower the power of the burner device. It was also shown that these losses remain very

small, which is typical for direct-flow burners.

According to the results of a comparative analysis of the mixture formation pattern for a series of burners with flow turbulators of different power, it is shown that with an increase in the power of the burner device, the mixing intensity of fuel and air decreases. However, in the presence of flow turbulators, this decrease is not as significant as in burners without turbulators.

According to a study of the combustion process in the presence and absence of flow turbulators, it was found that in the first case, despite a significant increase in the ignition perimeter, combustion begins on a significant part of the cross section corresponding to the flow out edge of the stabilizer. In the absence of a turbulizer, the beginning of combustion only corresponds to the area of the end surface of the stabilizer. This, along with significant turbulization of the flow, leads to an increase in the intensity of fuel burnout and a noticeable decrease in the temperature field unevenness in the cross sections of the torch when installing flow turbulators on the flow out edge of the flame stabilizers.

Based on the studies conducted, recommendations on the use of various modifications of the series of burners with cylindrical flame stabilizers were developed.

The results of the research are implemented in the SPC "Struino-nishevaia tekhnologia" (Jet and Niche Technology) on dryers for molded elements of the lining of power equipment, boilers of the type NIISTU, E-1.0-0, 9GN-2 and others.

Among the scientific results of the dissertation, obtained for the first time, we can note such.

1. For the first time for microjet low-power gas burners, data on a comparative analysis of the characteristics of the flow, mixture formation, heat transfer and fuel burn-up using cylindrical and flat flame stabilizers were obtained. It was found that the use of cylindrical stabilizers provides an increase in the level of flow turbulence, the speed of the mixture formation process, a decrease in the irregularity of the temperature field in the cross-sections of the torch, an intensification of the fuel burn-out process and a decrease in pressure losses in the burner.

2. For the first time, the possibility of regulating the process of mixing fuel and

oxidizer by changing the distance from the gas supply holes to the burner mouth for modifying the standard range of microjet burners with smooth cylindrical flame stabilizers with a power of 30-200 kW is investigated. It is shown that to ensure the so-called internal mixing in these burners (when there is almost complete mixing of fuel and oxidizer in the burner mouth), the gas supply holes must be located at a distance from the flow out edge of the stabilizer, equal to approximately 35 diameters of these holes.

3. For the first time, for the modification of low-power microjet burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of annular rectangular niche cavities on their side surfaces, the effects of these cavities on the working processes in the burners were revealed and the choice of their spatial characteristics was justified.

4. For the first time, the patterns of aerodynamics, mixing of fuel and oxidizer, fuel burn-up and the formation of temperature fields of the combustion zone for modifying the standard series of microjet burners with plate flow turbulators on the flow out edges of cylindrical flame stabilizers are established.

**Key words:** combustion, fire-technical facility, combustion technology, microjet burners, cylindrical flame stabilizers, niche cavities, flow turbulators.

***Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published***

1. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Mayson N.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klishch A.V., Strizheus S.N. & Timoshchenko A.B. Mathematical modeling of flow processes and mixture formation in a cylindrical stabilizer burner device. East European Journal of Advanced Technology. 2014. Vol. 3, No. 8 (69). P. 40-44. (rus) (*Applicant's contribution: participation in problem statement and analysis of mathematical modeling data*)

2. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Mayson N.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klisch A.V., Strizheus S.N., & Timoshchenko A.B. Intensification of transfer processes in a burner with a cylindrical flame stabilizer. Scientific Bulletin of UNFU. 2014. 24.5. P. 136-142. (rus) (*Applicant's contribution: participation in computational experiments, processing and analysis of results*)

3. Fialko N.M., Maletskaya O.E., Polozenko N.P., Regraghi A., Ganzha M.V. & Timoshchenko A.B. Computer simulation of temperature fields of combustion products in cylindrical stabilizer-type burner devices. International scientific journal "Internauka". 2019.Vol. 1, No. 17 (79). P.49-53.(rus) (*Applicant's contribution: participation in computational studies and preparation of materials for publication*)

4. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Mayson N.V., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovsky L.S., Polozenko N.P., Klishch A.V., Strizheus S.N., & Timoshchenko A.B. The influence of plate flow turbulators on the flow characteristics and mixture formation of fuel and oxidizer in a cylindrical stabilizer burner device. Scientific Bulletin of UNFU. 2014 24.6. P. 114-121. (rus) (*Applicant's contribution: participation in setting Research tasks and conducting computational experiments*)

5. Fialko N.M., Myson N.V., Meranova N. A., Ivanenko V., Yurchuk V. L., Ganzha M. V., Donchak M. I., Abdulin M. Z. & Timoshchenko O.B. Aerodynamics of burner devices with cylindrical flame stabilizers in the presence of flow turbulators at their flow out edges. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series "Technique and Energy of the AIC". 2016. No252. P.52-61. (ukr) (*Applicant's contribution:: participation in conducting a complex of computational experiments and analyzing the obtained data* )

6. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V. Polozenko N.P., Kutnyak O.M., Ganzha M.V., Regraghi A. & Timoshchenko O. B. Analysis of the possibilities of regulating the mixing process in microjet burners with cylindrical flame stabilizers. International scientific journal "Internauka". 2020. №12 (92). P.49-53.(ukr.) (*Applicant's contribution: participation in the development and implementation of research methodology, processing and generalization of results*)

7. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Meranova N.A., Butovsky L.S., Yurchuk V. L., Ivanenko G.V., Klishch A. V. & Timoshchenko O.B. The structure of the flow in the turbulator system is a niche cavity. Scientific Bulletin of UNFU. 2017.Vol. 27, No. 3. P. 131-135.(Ukr) (*Applicant's contribution: participation in computer modeling, analysis of results and preparation of materials for publication*)



8. Fialko N.M., Maletskaya O.E., Polozenko N.P., Regraghi A., Ganzha M.V. & Timoshchenko O.B. Computer simulation of temperature fields of combustion products in cylindrical stabilizer-type burner devices. International scientific journal "Internauka". 2019.Vol. 1, No. 17 (79). P.49-53.(Rus) (*Applicant's contribution: participation in problem statement and analysis of mathematical modeling results*)

9. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Seryi A.A., Sherenkovsky Yu.V., Milko E.I., Ozerov A.A., Klisch A.V., Olkhovskaya N.M., Shvetsova L.Ya. & Timoshchenko A.B. Temperature regimes of reverse flow zones in the near wake of cylindrical flame stabilizers. Scientific Bulletin of UNFU. 2018.V. 28, No. 3. P.97-100.(Ukr) (*Applicant's contribution: participation in experimental research and processing and analysis of results*)

10. Fialko N.M., Polozenko N.P., Kutnyak O.M., Dashkovska I.L., Klisch A.V., Regraghi A., Ganzha M.V. & Timoshchenko O.B. Modeling of turbulent flows in microjet burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of rectangular niche cavities. International scientific journal "Internauka".. 2020. № 12 (92). P. 43-46.(Ukr.) (*Applicant's contribution: participation in computational research and preparation of materials for publication*).

11. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovsky Yu.V., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovsky L.S. & Timoshchenko A.B. Efficiency of cooling systems of jet-stabilizer type burner devices. Technological systems. 2012. No. 1. P. 52-57. (rus) (*Applicant's contribution: participation in computational experiments and analysis of research results*)

12. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Prokopov V.G., Meranova N.O., Aleshko S.O., Polozenko N. P., Strizheus S. N. & Timoshchenko A.B. (2016). Comparative analysis of flow characteristics in burners with echeloned arrangement of flame stabilizers in isothermal conditions and during fuel combustion. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series "Technique and Energy of the AIC". 2016. No242. P.33-40. (ukr) (*Applicant's contribution: participation in computer modeling, processing and analysis of results*)

13. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Abdulin M.Z., Maletskaya O.E., Nochovny A.V. & Timoshchenko A.B. Analysis of the influence of the geometric shape of the niche cavity on the aerodynamic drag of the channel. *Industrial Heat Engineering*. 2012. No1. P. 72-76. (*Applicant's contribution: participation in setting research tasks and conducting computational experiments*)

14. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovsky Yu.V., Meranova N.A., Abdulin M.Z., Butovsky L.S. & Timoshchenko O.B. Analysis of the efficiency of cooling systems of stabilizer burner devices with guide baffles. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation*. 2013. No. 758. P. 46-51. (ukr) (*Applicant's contribution: participation in computational research and analysis of mathematical modeling data*)

15. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Mayson N.V., Meranova N.O. & Timoshchenko A.B. Heat and mass transfer processes in cylindrical burner devices with niche cavities. *Industrial heat engineering*. 2016. Vol. 38, No. 6. P.3-11. (rus) (*Contribution of the applicant: participation in the problem statement, conducting a set of computational experiments and analyzing the results obtained*)

16. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Meranova N.O., Mayson N.V. & Timoshchenko A.B. Flow features in cylindrical burner devices with plate flow turbulators. *Industrial heat engineering*. 2017. No1. P.5-12. (rus) (*Applicant's contribution: participation in setting Research tasks, computer modeling, processing and analysis of results*).

***Scientific works that testify to the approbation of materials of the dissertation:***

17. Fialko N.M., Davydenko B.V. & Timoshchenko A.B. Numerical simulation of the interaction of a vertically directed jet with a horizontal gas flow. *Problems of ecology and operation of energy facilities: materials of the XVII international conference (Sevastopol, June 6 - 10, 2006)*, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON. 2006. P.120-122.

18. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Meranova N.O. & Timoshchenko A.B. Torch stability characteristics in microjet burner devices. *Modern science: problems and*

innovations: II International scientific and practical conference (Stokholm, 3-5 May 2020). Stokholm, Sweden. 2020.P.265-268

19. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Polozenko N.P., Butovsky L.S. & Timoshchenko O.B. Patterns of heat transfer on the inner surface of flame stabilizers when using special cooling systems for microjet burner devices. Problems of ecology and operation of energy facilities: materials of the XXII International Conference (Yalta, June 8-12, 2012), Institute of Industrial Ecology. Kiev: "CPI ALKON." 2012.P. 159-162. (ukr)

20. Fialko N.M., Meranova N.O., Mayson M.V., Ivanenko G.V., Klishch A.V. & Timoshchenko A.B. Mathematical modeling of the flow in rectangular annular niches of cylindrical stabilizer burner devices. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2017.P. 110-114

21. Abdulin M., Fialko N., Meranova N. & Tymoshchenko O. Temperature regimes of circulating flows in the astern regions of flame stabilizers. *Scientific achievements of modern society: 7<sup>th</sup> International scientific and practical conference* (Liverpool, 4-6 march 2020). Liverpool, United Kingdom. 2020. P.16-20.

22. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Ivanenko G.V., Klishch A.V. & Timoshchenko A.B. Flow characteristics in a burner with angular flow turbulators. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2017.P. 99-101.

23. Fialko N.M., Ivanenko G.V., Mayson N.V., Polozenko N.P., Yurchuk V.L., Klishch A.V., Rokitko K.V., Donchak M.I. & Timoshchenko A.B. Temperature fields in the combustion zone for burners with flat and cylindrical flame stabilizers. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2018.P. 74-78

24. Fialko N.M., Maletskaya O.E., Polozenko N.P., Regragui A., Ganzha M.V. & Timoshchenko A.B. Intensification of combustion processes in microjet burner

devices. Actual problems of modern science: XLV International Scientific and Practical Conference (Kharkov – Vienna – Berlin – Astana, November 28, 2019). 2019.S. 22-23.

25. Butovsky L.S., Fialko N.M., Prokopov V.G., Zaritsky A.A., Sherenkovsky Yu.V. & Timoshchenko O.B. Experimental studies of the flow structure in stabilizer-type burner devices using angular flow turbulators. Problems of ecology and operation of energy facilities: materials of the XXII International Conference (Yalta, June 8-12, 2012), Institute of Industrial Ecology. Kiev: "CPI ALKON." 2012.P. 141-145. (ukr)

26. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Mayson M.V., Abdulin M.Z., Khomuk S.V., Enina A.A., Novitsky V.S. & Timoshchenko O.B. Increasing the intensity of transfer processes in a cylindrical stabilizer burner by using rectangular annular niches. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2014.P. 122-125

27. Fialko N.M., Maletskaya O.E., Polozenko N.P., Regragui A., Ganzha M.V. & Timoshchenko A.B. Thermal state of the combustion zone of cylindrical microjet burner devices. Actual problems of modern science: XLV International Scientific and Practical Conference (Kharkov – Vienna – Berlin – Astana, November 28, 2019). 2019.P. 20-21.

28. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Polozenko N.P., Olkhovskaya N.N., Klishch A.V. & Timoshchenko A.B. Modeling the flow structure and mixture formation in stabilizer-type burner devices under conditions of asymmetric fuel supply. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2019.P. 62-66

29. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Seryi A.A., Milko E.I., Ozerov A.A., Olkhovskaya N.N., Shvetsova L.A. & Timoshchenko A.B. Torch stability in stabilizer cylindrical burner devices. Problems of ecology and operation of energy facilities: proceedings, Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALKON NAS of Ukraine. 2018.P. 79-82

30. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Yurchuk V.L., Novakovsky M.A., Klishch A.V. & Timoshchenko A.B. Comparative analysis of the efficiency of

cooling systems of stabilizing burner devices at different load of the boiler unit. Problems of industrial heat engineering: materials of the VIII international conference (Kiev, October 8-11, 2013). Kiev. (Electronic Edition). (rus)

31. Fialko N.M., Meranova N.O., Aleshko S.A., Ivanenko G.V., Myson N.V., Khmil D.P. & Timoshchenko A.B. Fuel and oxidizer flow characteristics in stabilizer burners with niche cavities. Problems of thermal physics and thermal energy: materials of the Xth International Conference (Kyiv, 23–25 may 2017). Kiev. 2017.P. 30.

32. Prokopov V.G., Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko S.A, Meranova N.A., Abdulin M.Z., Kutnyak A.N. & Timoshchenko A.B. Mathematical modeling of aerodynamics and heat transfer in cooling systems of stabilizer burner devices. Problems of ecology and operation of energy facilities: materials of the XX international conference (Yalta, June 7-11, 2011), Institute of Industrial Ecology. Kiev: "CPI ALKON." 2011.P. 177-179. (ukr)

33. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Polozenko N.P., Butovsky L.S., & Timoshchenko O.B. Patterns of heat transfer on the inner surface of flame stabilizers when using special cooling systems for microjet burner devices. Problems of ecology and operation of energy facilities: materials of the XXII International Conference (Yalta, June 8-12, 2012), Institute of Industrial Ecology. Kiev: "CPI ALKON." 2012.P. 159-162. (ukr)

***Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation***

***Patents:***

34. Utility model patent № 143503, Ukraine. Burner device. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Timoshchnko O. B., Kunik A.A. // publ. 27 July 2020.

## ЗМІСТ

<b>СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>31</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>33</b>
<b>РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>38</b>
1.1. Особливості робочих процесів у пальникових пристроях стабілізаторного типу на базі циліндричних каналів з розширенням.....	38
1.2. Аналіз різних способів інтенсифікації процесів спалювання палива у стабілізаторних пальникових пристроях.....	50
1.3. Комп'ютерне моделювання процесів переносу при горінні газоподібного палива.....	52
1.4. Мета та постановка завдань досліджень.....	60
1.5. Висновки за розділом.....	61
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ ПОЛУМ'Я.....</b>	<b>62</b>
2.1. Математична постановка задачі.....	62
2.2. Верифікація моделей турбулентного переносу та аналіз достовірності даних комп'ютерного моделювання.....	65
2.3. Особливості методики експериментальних досліджень....	70
2.4. Висновки за розділом.....	72
<b>РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ З ГЛАДКИМИ ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ ПОЛУМ'Я.....</b>	<b>74</b>

3.1. Порівняльний аналіз закономірностей протікання робочих процесів у пальниках з циліндричними і плоскими стабілізаторами полум'я.....	74
3.2. Конструктивні параметри типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами потужністю 30-200 кВт....	85
3.3. Структура течії палива й окиснювача у пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я.....	88
3.4. Особливості сумішоутворення палива й окиснювача у пальниках досліджуваного типу.....	92
3.5. Вплив відстані між зривною кромкою та газоподавальними отворами на характеристики процесів переносу в пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я.....	96
3.6. Пускові та зривні характеристики пальників досліджуваного типу.....	99
3.7. Висновки за розділом.....	102
<b>РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ З КІЛЬЦЕВИМИ ПРЯМОКУТНИМИ НІШАМИ.....</b>	<b>103</b>
4.1. Вибір розмірів кільцевої ніши для типоряду пальникових пристроїв.....	103
4.2. Визначення для типоряду досліджуваних пальникових пристроїв місця розташування нішової порожнини та відстані між струменями.....	106
4.3. Особливості робочих процесів мікрофакельних пальникових пристроїв з нішовими порожнинами.....	108
4.4. Висновки за розділом.....	118

<b>РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТУРБУЛІЗАТОРІВ ПОТОКУ.....</b>	<b>120</b>
5.1. Особливості течії у пальниках з турбулізаторами потоку...	120
5.2. Закономірності сумішоутворення палива та окиснювача в досліджуваних пальникових пристроях.....	138
5.3. Температурні поля продуктів горіння і особливості вигорання палива у пальниках з турбулізаторами потоку..	146
5.4. Висновки за розділом.....	149
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>150</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>153</b>
<b>ДОДАТОК А</b> Рекомендації щодо застосування типоряду мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я.....	169
<b>ДОДАТОК Б</b> Акт впровадження результатів роботи.....	171
<b>ДОДАТОК В</b> Патент України.....	173



## СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

$B_T$  – ширина турбулізаторів потоку;

$D$  – діаметр каналу пальникового пристрою;

$d_{ст}$  – діаметр стабілізатора;

$d$  – діаметр газоподавальних отворів;

$H$  – глибина нішової порожнини;

$I$  – інтенсивність турбулентності;

$k_f$  – коефіцієнт загромадження прохідного перерізу каналу;

$L$  – довжина нішової порожнини;

$L_1^*$ ,  $L_0$  – відстань від передньої і задньої зривної кромки стабілізатора полум'я відповідно;

$L_{зт}$  – протяжність зони зворотних токів;

$N_{п}$  – потужність пальникового пристрою;

$N$  – кількість газоподавальних отворів;

$P$ ,  $\Delta P$  – статичний тиск та його перепад у пальниковому пристрої ;

$r$  – полярна координата;

$S$  – крок розташування газоподавальних отворів;

$t$  – температура;

$T$  – абсолютна температура;

$U$ ,  $U'$  – швидкість та середньоквадратичне значення пульсацій швидкості;

$x$ ,  $y$ ,  $z$  – координати в декартовій системі;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;

$\gamma$  – коефіцієнт відносної нерівномірності поля температур  $\gamma = \frac{T_{\max} - T_{cp}}{T_{cp} - T_e}$ ;

$\delta$  – відносні відхилення;

$\eta_z$  – коефіцієнт повноти згоряння палива.

$\varphi$  – полярна координата;

### Індекси:

$\Gamma$  – газ;

п – повітря;

вх – вхід;

вих – вихід;

max – максимальне значення;

c – стінка;

ср – середнє значення;

ст – стабілізатор;

т – турбулізатор;

з.т. – зворотні токи

риска над позначеннями відповідає безрозмірній величині.

### **Скорочення**

DES (Detached Eddy Simulation) – метод моделювання від'єднаних вихорів;

DNS (Direct Numerical Simulation) – метод прямого чисельного моделювання;

EDM (Eddy Dissipation model) – модель дисипації вихорів;

FDF (Filtered Density Function) – фільтрована функція розподілу ймовірностей;

LES (Large Eddy Simulation) – метод моделювання великих вихорів;

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) – методи, що базуються на осереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса;

PDF (Probability Density Function) – функція розподілу ймовірностей.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Пальникові пристрої відносно малої потужності широко застосовуються в енергетичному обладнанні різного призначення. Їх використання є вельми ефективним для вогнетехнічних об'єктів не тільки порівняно невеликої, але й різної теплової продуктивності за умов, коли висувуються високі вимоги до рівномірності теплопідводу по вогневому простору.

Для зазначених ситуацій доцільним виявляється використання пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я. Їх більш висока ефективність в порівнянні з традиційними пальниковими пристроями, в яких застосовуються плоскі стабілізатори, обумовлена, головним чином, більшою інтенсивністю їхніх робочих процесів.

Практично важливим є також те, що циліндричні пальникові пристрої прості у виготовленні, завдяки особливостям конфігурації порівняно легко інтегруються в конструкцію енергетичного обладнання, характеризуються низькою металоємністю, легкістю проведення ремонтних робіт тощо.

Відсутність необхідної повноти досліджень теплофізичних аспектів технології спалювання палива в пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я зумовлює актуальність даної роботи.

Щодо стану досліджень з даної тематики, то як свідчить проведений аналіз, стабілізаторні пальникові пристрої, що базуються на використанні циліндричних елементів, знаходять широке застосування в енергетичній практиці - модульні елементи камер згоряння АВВ, різні пальники трубчастого типу на базі циліндричних каналів з розширенням (спільні розробки НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ІГ НАН України и ВАО «Укргазпроект») та ін. Дослідженню тепломасопереносу в таких пальникових пристроях, присвячені роботи В.О. Христича, Г.М. Любчика, Г.Б. Варламова, Г.С. Марченка, Г.О. Мікуліна та ін.

Щодо розглянутих в цій роботі пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я, то теплофізичні дослідження тут практично відсутні. Дана робота покликана заповнити цю прогалину.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Основні результати роботи отримані в рамках виконання двох бюджетних тем: «Розробка теплофізичних основ технології комбінованого дифузійного і кінетичного спалювання природного газу в топках котлів» (№ ГР 0109U002854); «Теплофізичне обґрунтування прогресивних технологій мікрофакельного спалювання палива та утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів і теплових установок технологічного призначення» (№ ГР 0112U002278); спільного проекту фондів фундаментальних досліджень України та Білорусії «Інтенсифікація процесів горіння в пальникових пристроях стабілізаторного типу і топках киплячого шару» (№ ГР 0114U004368) та двох господарських договорів: «Математичне моделювання аеродинаміки і сумішоутворення в стабілізаторних пальникових пристроях і розробка рекомендацій щодо створення їх натурних зразків і впровадження» та «Математичне моделювання процесів переносу в пальникових пристроях стабілізаторного типу при використанні різних способів інтенсифікації процесу горіння і розробка рекомендацій щодо їх впровадження» (№ ГР 0111U008856с).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є теплофізичне обґрунтування технології спалювання газоподібного палива для типоряду пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю від 30 до 200 кВт при подачі палива зануренням в зносячий потік окиснювача і розробка на цій основі рекомендацій щодо застосування різних модифікацій таких пристроїв.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

1. Виконати порівняльний аналіз основних особливостей перебігу робочих процесів мікрофакельних пальників з гладкими циліндричними і плоскими стабілізаторами полум'я.
2. Дослідити закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача, вигорання палива та формування температурних полів в зоні горіння для різних модифікацій мікрофакельних пальників малої потужності – з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я та при застосуванні кільцевих нішових порожнин і турбулізаторів потоку.

3. Для пальникових пристроїв з гладкими стабілізаторами полум'я виявити закономірності зриву горіння та виконати аналіз можливості регулювання процесів сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника.
4. На основі досліджень процесів переносу в пальникових пристроях з кільцевими нішовими порожнинами визначити раціональні конструктивні параметри даної модифікації пальників малої потужності.
5. Виконати зіставлення основних характеристик робочих процесів у пальниках малої потужності за наявності і відсутності турбулізаторів потоку, встановлених на зривних кромках стабілізаторів полум'я.

*Об'єкт дослідження* - робочі процеси в пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я.

*Предмет дослідження* – характеристики процесів переносу в циліндричних пальникових пристроях різних модифікацій.

*Методи дослідження.* Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи математичного моделювання та експериментальні методи дослідження.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень** базується на використанні сучасних методів фізичного і математичного моделювання, на задовільному узгодженні результатів виконаних експериментальних досліджень і даних комп'ютерного моделювання. Достовірність наукових положень і висновків, які захищаються, підтверджується також досвідом впровадження розроблених пальникових пристроїв.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

5. Вперше для мікрофакельних газових пальників малої потужності одержано дані порівняльного аналізу характеристик течії, сумішоутворення, теплопереносу та вигорання палива при застосуванні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я. Встановлено, що при застосуванні циліндричних стабілізаторів забезпечується підвищення рівня турбулізації потоку, швидкості процесу

сумішоутворення, зменшення нерівномірності поля температур у поперечних перерізах факела, інтенсифікація процесу вигорання палива та зменшення втрат тиску у пальнику.

6. Вперше досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт. Показано, що для забезпечення у вказаних пальниках так званого внутрішнього сумішоутворення (коли в усті пальника має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розташовувати на відстані від зривної кромки стабілізатора, що дорівнює приблизно 35 діаметрам цих отворів.

7. Вперше для модифікації мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях виявлено ефекти впливу даних порожнин на робочі процеси в пальниках та обґрунтовано вибір їх просторових характеристик.

8. Вперше встановлено закономірності аеродинаміки, змішування палива і окиснювача, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках циліндричних стабілізаторів полум'я.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати виконаних досліджень використано при розробці різних модифікацій циліндричних пальникових пристроїв стабілізаторного типу. Дані пальникові пристрої застосовуються в вогнетехнічних об'єктах невеликої продуктивності, а також в умовах, коли необхідним є забезпечення високого ступеня рівномірності теплопідводу у вогневому просторі.

Зазначені пальникові пристрої впроваджені в енергетичну практику на сушилах фасонних елементів футерування енергетичного обладнання, котлах типу «НІСТУ», Е-1,0-0,9ГН-2 та ін.

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі стану проблеми, розробленні принципових схем пропонуванних пальників та рекомендацій щодо умов їх впровадження. Автор брав участь у постановці завдань досліджень, проведенні обчислювальних і натурних експериментів та аналізі отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на таких конференціях: на VIII та X Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, жовтень 2013 р., травень 2017 р.); на XVI, XXI, XXII, XXVI, XXVII та XXVIII Міжнародних конференціях «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (м. Севастополь, червень 2006 р; м. Ялта, червень 2011 р., 2012 р., м. Київ, грудень 2014 р., 2017 р, 2018 р., 2019 р.); на XLV Міжнародній науково - практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки» (Харків - Відень - Берлін –Астана, листопад 2019 р.); на міжнародних конференціях: 7<sup>th</sup> International scientific and practical conference «Scientific achievements of modern society» (Liverpool, March 2020); II International scientific and practical conference «Modern science: problems and innovations» (Stockholm, May 2020).

**Публікації.** Основні наукові положення, які повністю розкривають зміст і результати дисертації, викладено в 34 друкованих працях, зокрема, у 12 статтях, що входять до наукометричних баз даних, 4 статтях у наукових фахових виданнях України та 17 публікаціях у збірниках наукових праць за матеріалами конференцій. За результатами роботи одержано патент України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та трьох додатків. Об'єм роботи становить 174 сторінок, включаючи 77 ілюстрацій, 9 таблиць. Перелік використаних літературних джерел складає 140 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі дається аналіз сучасного стану досліджуваної проблематики, формулюється мета роботи і завдання дослідження. Наводиться огляд літературних даних щодо закономірностей робочих процесів в стабілізаторних пальниках на базі циліндричних каналів з розширенням. Розглядаються різні способи інтенсифікації процесів горіння в пальникових пристроях стабілізаторного типу. Обговорюються основні підходи математичного моделювання процесів переносу в умовах спалювання газоподібного палива.

#### 1.1. Особливості робочих процесів в пальникових пристроях стабілізаторного типу на базі циліндричних каналів з розширенням

Одним з ключових питань при розробці пальникових пристроїв є забезпечення стійкого горіння в необхідних діапазонах зміни режимних параметрів. Серед розмаїття різних підходів до вирішення цього питання значне місце займає підхід, заснований на стабілізації полум'я за важкообтічними тілами – стабілізаторами полум'я. Широке поширення в енергетичній практиці знаходять стабілізаторні пальникові пристрої, що базуються на використанні циліндричних елементів. До них, зокрема, відносяться пальники трубчастого типу на базі циліндричних каналів з розширенням. Вивченню робочих процесів в них присвячено багато робіт (див., наприклад [1-19]). Розглянемо далі основні особливості трубчастих технологій спалювання палива.

Пальникові пристрої на базі трубчастих модулів з раптовим розширенням характеризуються простотою конструкції і технології виготовлення в поєднанні з можливістю реалізації різних видів змішування палива й окиснювача, в тому числі: дифузійного, попереднього і комбінованого. Трубчастий модуль складається з двох послідовно розміщених елементів: вхідної ділянки (раптове звуження потоку-контур a-bc-f) і основної ділянки у вигляді раптового розширення потоку (насадка Борда – контур c-f-g-h). Між перерізами d-c и f-e, що об'єднують дані ділянки,



знаходиться паливний колектор (контур b-c-f-g) (рис. 1.1).

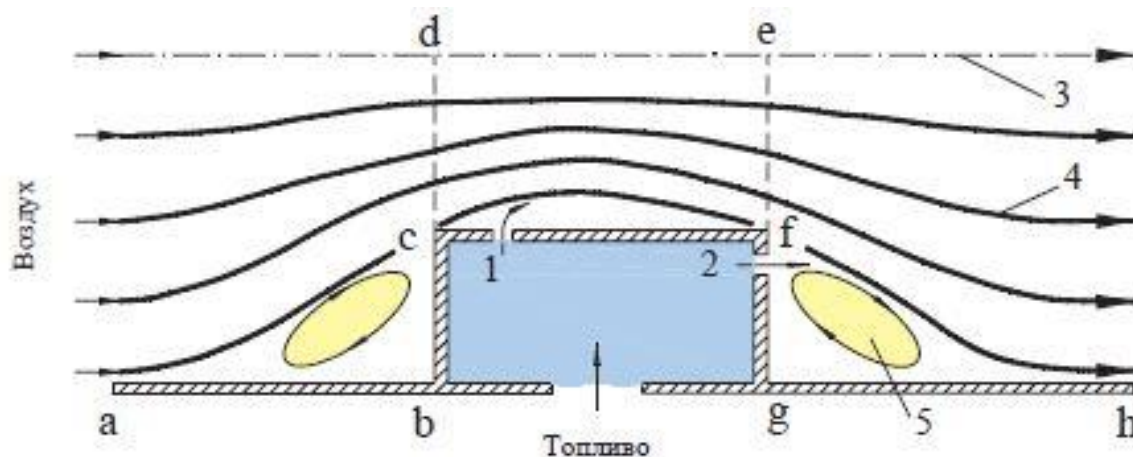


Рис. 1.1. Схема трубчастого модуля: 1 – попередня подача палива; 2 – дифузійна подача палива; 3 – вісь симетрії; 4 – лінії току; 5 – тороїдальний вихор.

В умовах дифузійного сумішоутворення (модуль ТМД) подача палива в зону горіння може відбуватися за класичною схемою коаксіальних струменів (центральна повітряна – периферійна – кільцева газова), а також за методом струменів, що стикаються (близько центрального повітряного струменя розвивається система газових струменів меншого діаметру, які розташовані на торцевій поверхні f-g). В обох випадках схема підведення палива адекватно вписується в зону максимальної турбулентності течії. Крім того, в цьому випадку відбувається додаткова турбулізація прикореневої зони за рахунок витікання газових струменів через отвори на торцевій стінці f-g каналу насадки Борда. При попередньому змішуванні палива і окиснювача (модуль ТМП) подача палива здійснюється радіальними струменями в зносячий потік повітря через отвори, розташовані на циліндричній поверхні c – d. Можлива також комбінована подача палива (модуль ТМК).

Спосіб паливоподачі багато в чому визначає граничні характеристики трубчастих модулів: займання, «бідне» і «багате» згасання факела (рис. 1.2). Як видно з рис. 1.2, граничні характеристики мають звичайний для теорії і практики горіння вуглеводневих палив вигляд. Однак, в кількісному відношенні між ними є істотні відмінності. Особливо це помітно при порівнянні граничних характеристик модуля ТМП з аналогічними характеристиками модулів ТМДН і ТМД. Ця

відмінність відповідає відомим уявленням щодо умов стабільного горіння при попередньому і дифузійному сумішоутворенні. Найбільш вузький діапазон стійкого горіння спостерігається при використанні модуля з попереднім сумішоутворенням (рис. 1.2, а). Стабільне займання при цьому відбувається всередині діапазону стійкого горіння ( $1,0 < \alpha_{\text{вос}} < 2,0$ ), і зафіксована в експериментах зона стабільного займання вже достатньо відповідних зон для модулів дифузійного типу (ТМДН и ТМД). Для останніх діапазон займання практично збігається і зміщений у бік високих надлишків повітря ( $3,0 < \alpha_{\text{вос}} < 7,0$ ).

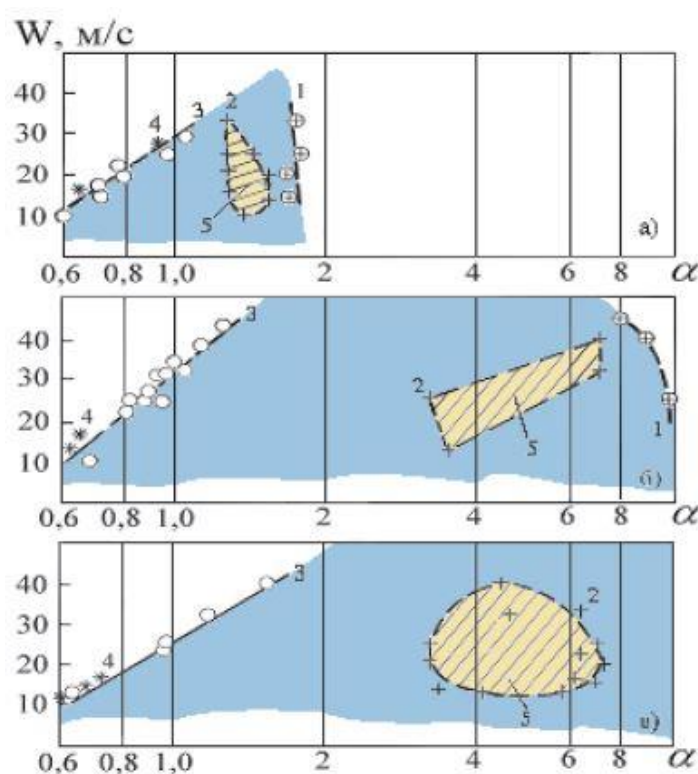


Рис. 1.2. Граничні характеристики горіння природного газу за різних умов змішування палива й окиснювача (а – модуль ТМП; б – модуль ТМДН; в – модуль ТМД): 1 – «бідне» згасання факела; 2 – межа електроіскрового займання; 3 – режими стійкого горіння; 4 – режими «багатого» зриву; 5 – зона стійкого займання.

Межі «багатого» зриву для трьох типів модулів збігаються частково (в області швидкостей повітря до 20 м/с). При більш високій швидкості модуль ТМДН має більш широкий діапазон стійкого горіння, а модуль ТМД - найвужчий діапазон в багатій області та більш широкий діапазон стійкого горіння в бідній області.

Істотний вплив на емісійні характеристики трубчастих модулів дає спосіб

змішування палива й окиснювача (рис.1.3).

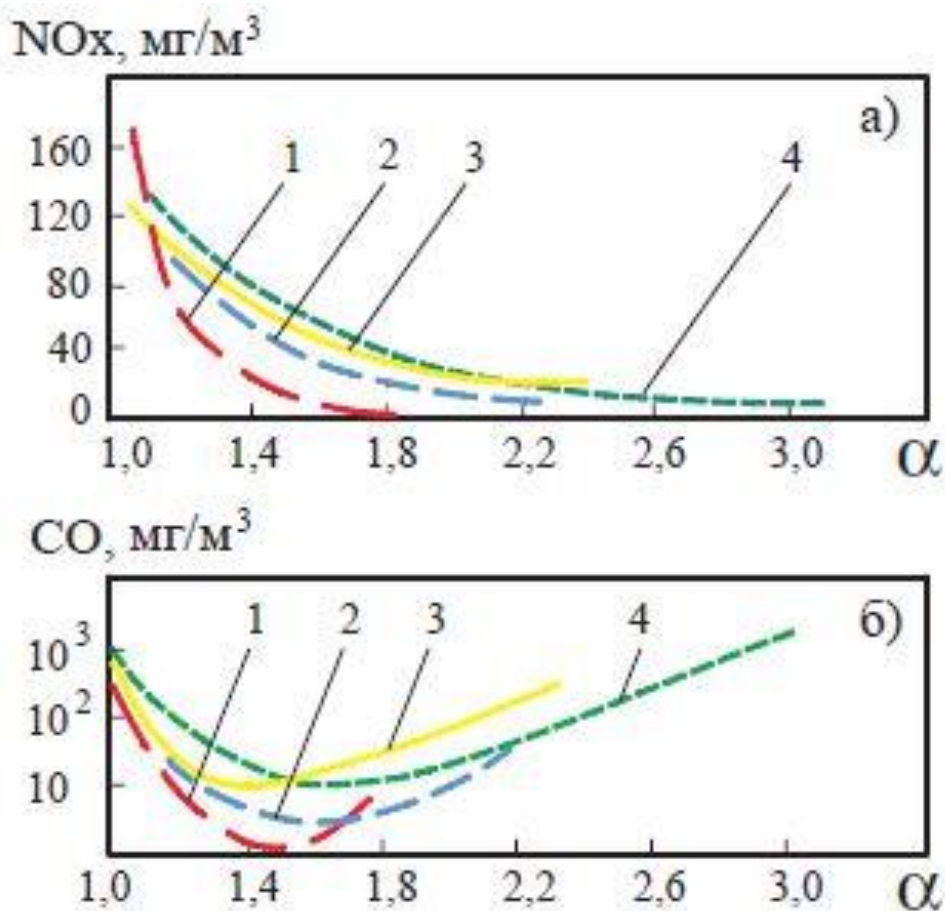


Рис. 1.3. Вплив надлишку повітря на концентрацію оксидів азоту (а) і оксиду карбону (б) при спалюванні природного газу в одиночних трубчастих модулях різного типу: 1 – елемент без внутрішньої насадки з дифузійним сумішоутворенням (тип ТМД); 2 – елемент з внутрішньою насадкою з дифузійним сумішоутворенням (тип ТМДН); 3 – елемент з внутрішньою насадкою з комбінованим сумішоутворенням (тип ТМК); 4 – елемент з внутрішньою насадкою та попереднім сумішоутворенням (тип ТМП).

Як видно з рис 1.3, емісійні характеристики мають неоднозначну форму, причому залежність  $NO_x = f(\alpha)$  має максимум в області  $\alpha_{кр1} \approx 1,03...1,05$ , а залежність  $CO = f(\alpha)$  приймає мінімальні значення в області  $\alpha_{кр2} \approx 1,7...1,8$ . Спільний аналіз характеристик  $NO_x = f(\alpha)$  і  $CO = f(\alpha)$  вказує на існування трьох характерних зон впливу величини надлишку повітря в області  $1,0 \leq \alpha \leq 3,0$ .

У першій зоні (при  $\alpha < \alpha_{кр1}$ ) має місце неоднозначний вплив  $\alpha$  на рівень емісії  $NO_x$  і  $CO$  в продуктах згоряння: Зі зменшенням  $\alpha$  концентрація  $NO_x$  різко спадає, а

концентрація CO різко зростає.

Друга зона ( $\alpha_{кр1} \leq \alpha \leq \alpha_{кр2}$ ) характеризується однозначним напрямом впливу надлишку повітря на обидві емісійні характеристики і відповідає одночасному зниженню концентрації  $NO_x$  і CO при збільшенні  $\alpha$ .

У третій зоні ( $\alpha > \alpha_{кр2}$ ) знову виявляється неоднозначність впливу  $\alpha$  на емісію  $NO_x$  і CO, що характеризується подальшим зменшенням концентрації  $NO_x$  (як і в другій зоні) і зростанням концентрації CO зі збільшенням  $\alpha$ .

За характером розподілу концентрацій оксидів азоту в продуктах згоряння при зміні надлишку повітря (рис. 1.3, а) базові емісійні характеристики  $NO_x = f(\alpha)$  для різних типів трубчастих модулів подібні. Цей же висновок справедливий і для характеристик  $CO = f(\alpha)$ , які представлено на рис. 1.3, б. Подібність емісійних характеристик для різних типів трубчастих модулів визначається не тільки існуванням трьох характерних зон емісії  $NO_x$  і CO, але і однозначним положенням межі розділу між першою і другою зонами емісії (в усіх випадках  $\alpha_{кр1} \approx 1,03 \dots 1,05$ ).

В окремих деталях характеристики  $NO_x = f(\alpha)$  і  $CO = f(\alpha)$  мають помітні відмінності, які можна пояснити на основі загальноприйнятих уявлень про механізм горіння вуглеводневих палив.

Згідно з даними щодо дослідження дифузійного факела в трубчастому паливоспалювальному модулі в [6] показано, що він має на форсованих режимах (незважаючи на дискретну подачу палива в вихрову зону) замкнуту порожнисту структуру; зона вигорання факела формується в приграничному шарі повітряного струменя, що витікає з центрального (повітряного) каналу модуля, довжина факела ( $l_f$ ) змінюється зі зміною витрати паливного газу (див. 1.4), а в тіньовій зоні за торцевою стінкою модуля утворюється тороїдальна вихрова течія, що є джерелом стабілізації факела.

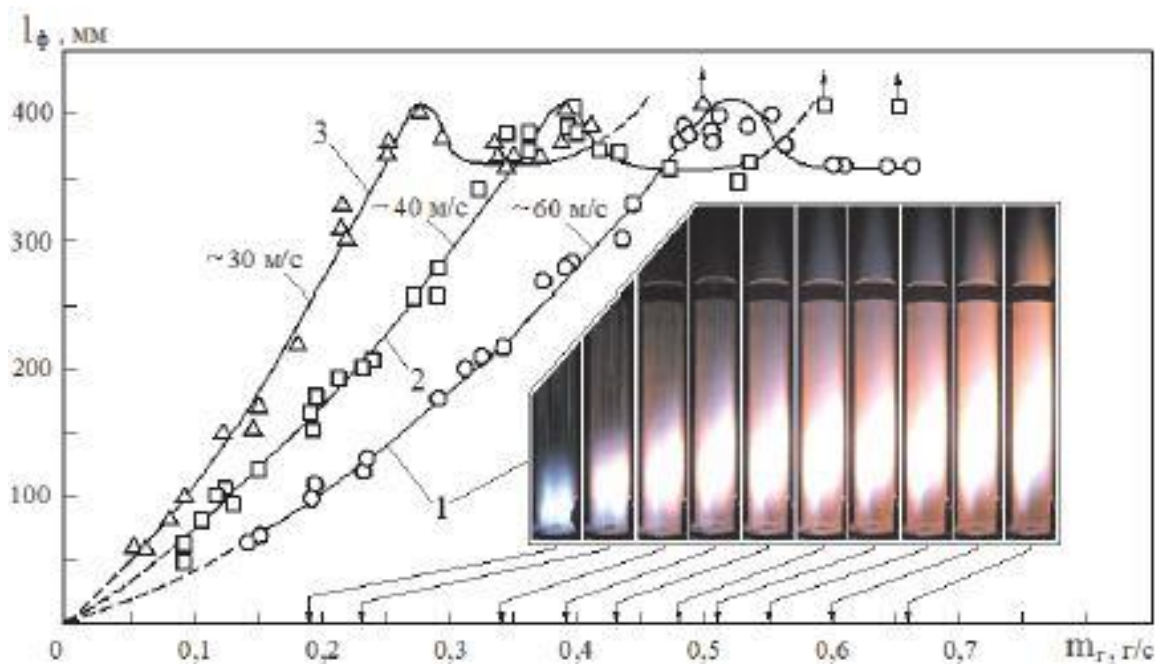


Рис. 1.4. Вплив витрати палива і швидкості повітря в повітряному каналі на довжину дифузійного факела: 1, 2 і 3 – характеристики повної (видимої) довжини факела  $l_{\phi} = f(m_g)$  при різних рівнях швидкостей повітря у внутрішньому каналі модуля.

На всіх режимах (за швидкістю витікання палива) факел в трубчастому модулі має турбулентну структуру, що визначається турбулентним режимом витікання повітряного струменя, для якої в досліджуваному діапазоні швидкостей число Рейнольдса ( $Re = W_{в.к} \cdot d_1 / \nu$ ) змінювалося в діапазоні  $Re \approx (3,2 \dots 6,4) \cdot 10^4$ .

За результатами дослідження зафіксовано режими, за яких спостерігається відрив факела від торцевої стінки модуля і величина відриву ( $l_{отр}$ ) практично лінійно зростає зі збільшенням витрати палива.

Із розвитком факела в трубчастому модулі відсутні чітко помітні його границі, і факел складається з двох частин: внутрішнього ядра, що світиться, висотою  $l'_{\phi}$  та зовнішньої «розмитой» оболонки висотою  $\Delta l_{\phi} = l_{\phi} - l'_{\phi}$ . Товщина «розмитой» області факела ( $\Delta l_{\phi}$ ) істотно зростає зі збільшенням витрати палива, що ілюструється даними, наведеними на рис. 1.3, де відображено діаграму структури факела при використанні в якості визначального фактора – витрати паливного газу ( $m_g$ ). При цьому, характеристики далекобійності факела  $l_{\phi} = f(m_g)$  розширюються за швидкістю витікання повітряного струменя, тобто є індивідуальними для

відповідного рівня аеродинамічного форсування перерізу модуля і мають явно виражені ознаки подібності.

Зазначений характер поведінки розвитку факела підтверджується даними, що представлені у вигляді узагальненої діаграми його структури (рис. 1.5), в якій використовується як визначальний фактор показник відносної витрати паливного газу ( $\bar{m}_r = m_r/m_{\Pi}$ ).

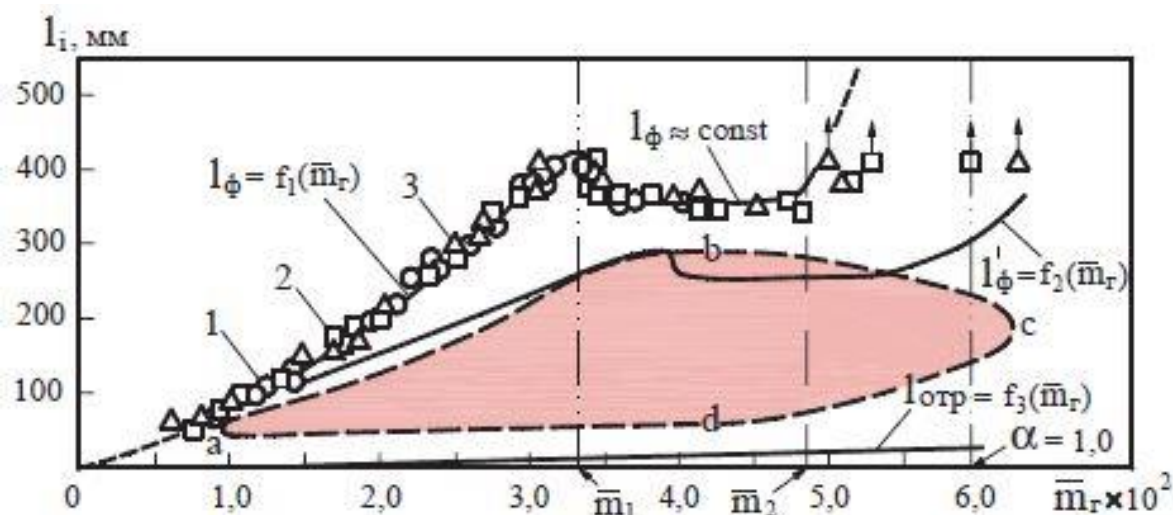


Рис.1.5. Узагальнена діаграма структури дифузійного факела: 1 –  $W_{\Pi} \approx 60$  м/с; 2 –  $W_{\Pi} \approx 40$  м/с; 3 –  $W_{\Pi} \approx 30$  м/с ( $l_i$  – ордината положення границь основних характеристик структури факела і зони його розвитку).

На представленій діаграмі показано положення границь основних характеристик структури факела і зони його розвитку, в тому числі: характеристику повної довжини факела  $l_{\phi} = f_1(\bar{m}_r)$  і довжини його внутрішнього ядра  $l_{\phi} = f_2(\bar{m}_r)$ , характеристику відриву факела від торцевої стінки модуля  $l_{отр} = f_3(\bar{m}_r)$  та зону a-b-c-d, що відображає осереднене положення нижньої (вітка a-d-c) та верхньої (вітка a-b-c) меж області інтенсивного тепловиділення по висоті розвитку факела. Верхня границя області інтенсивного тепловиділення при  $\bar{m}_r < \bar{m}_2$  практично збігається з верхньою границею ядра факела, а найбільша висота цієї області спостерігається в діапазоні  $\bar{m}_1 < \bar{m}_r < \bar{m}_2$ .

Факт автомодельності характеристик далекобійності в трубчастому пальниковому пристрої від відносної витрати палива ( $\bar{m}_r$ ) на регулярному, перехідному та автомодельному режимах розвитку факела дає можливість значно

спростити аналіз умов формування факела в трубчастих модулях за рахунок використання дуже важливого для вирішення практичних завдань параметра впливу на довжину факела – коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha$ ), який пов'язаний з відносною витратою палива балансним співвідношенням  $\alpha = (L_0 \cdot \bar{m}_r)^{-1}$ , де  $L_0$  – стехіометричний коефіцієнт, кг/кг. Можливості використання коефіцієнта надлишку повітря як фактора, що визначає умови розвитку факела в трубчастому модулі, показані на рис. 1.6.

Характер залежності далекобійності факела  $l_\phi = f(\alpha)$  вказує на дуже важливу для практичного застосування трубчастих модулів особливість їх робочого процесу - широкий діапазон стійкого спалювання палива за коефіцієнтом надлишку повітря: від  $\alpha$ , близьких до 1,0 та менше, до  $\alpha$ , що наближаються до 10. Дана властивість трубчастої технології є унікальною в порівнянні з іншими відомими технологіями спалювання палива. Спільний аналіз характеристики повної висоти факела  $l_\phi = f(\alpha)$  і області світності a-b-c-d бічної поверхні кварцевої трубки модуля дозволяє пояснити ряд специфічних особливостей формування дифузійного факела на всіх характерних режимах його розвитку. Це відноситься, перш за все, до регулярного режиму розвитку факела, який має місце при  $\alpha > \alpha_{кр}$ .

У цих умовах форма характеристики далекобійності  $l_\phi = f(\alpha)$  і положення правої вітки верхньої межі (b – a) зони інтенсивного тепловиділення є подібними, а висота ядра факела  $l_\phi = f(\alpha)$  практично збігається з верхньою межею (b – a) інтенсивного тепловиділення.

У ядрі факела має місце зона інтенсивного тепловиділення, що й пояснює розмитість його верхньої межі та існування зовнішньої оболонки, світність якої менша, ніж світність ядра через істотне зниження концентрацій паливних газів і гомогенізації структури зони горіння у верхній частині факела.

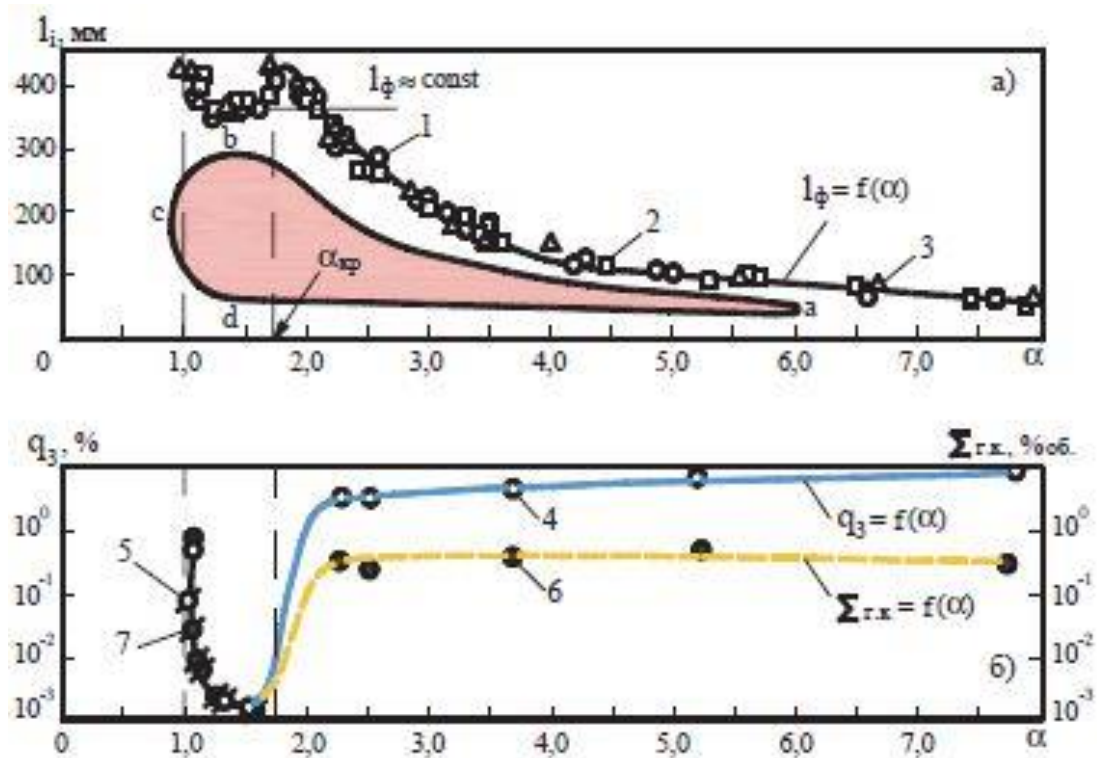


Рис. 1.6. Порівняння характеристик далекобійності та інтенсивності тепловиділення (а) з характеристиками хімічної неповноти згоряння (б) дифузійного факела: 1 –  $W_B \approx 60$  м/с; 2 –  $W_B \approx 40$  м/с; 3 –  $W_B \approx 30$  м/с; 4 і 6 –  $q_3$  та  $\Sigma_{г.к.}$ , які визначено за допомогою хроматографа «ГАЗОХРОМ»; 5 і 7 – концентрація CO, визначена за допомогою газоаналізатора TESTO 30.

Апроксимація дослідних даних, що описують вплив коефіцієнта надлишку повітря на відносну висоту характерних зон розвитку факела дозволила отримати рівняння регресії у вигляді поліномів другого ступеня як для повної довжини факела

$$\bar{l}_{\phi} = 1 + 14 \cdot \alpha^{-1} + 61 \cdot \alpha^{-2} \pm 0,61,$$

так і для його ядра

$$\bar{l}'_{\phi} = -1 + 34 \cdot \alpha^{-1} - 9 \cdot \alpha^{-2} \pm 0,58$$

при ступені кореляції  $R = 0,99$ .

Отримані рівняння регресії дозволяють оцінити вплив надлишку повітря на висоту зони факела, що світиться слабко  $\Delta l_{\phi} = (l_{\phi} - l'_{\phi})/d_1$  за допомогою співвідношення



$$\Delta \bar{l}_{\phi} = 2 + 20 \cdot \alpha^{-1} + 70 \cdot \alpha^{-2},$$

форма якого вказує на збільшення висоти зовнішньої оболонки факела зі зменшенням коефіцієнта надлишку повітря, а отже, і зі збільшенням тепловиділення в зоні розвитку факела в області  $\alpha < \alpha_{кр}$ .

При  $\alpha > \alpha_{кр}$  спостерігається криза далекобійності, появу якої можна пояснити двома причинами:

1) Впливом кінетичного фактора в результаті зростання рівня тепловиділення в зоні розвитку факела і збільшення температури реакційної зони, що відповідно до закону Арреніуса призводить до зростання швидкості згоряння палива. Непрямим підтвердженням зростання рівня тепловиділення є досягнення максимальної висоти поверхні світіння кварцової трубки при  $\alpha \rightarrow \alpha_{кр}$ .

2) Впливом дифузійного фактора, в результаті інтенсифікації масообмінних процесів по висоті розвитку факела за рахунок додаткової генерованої полум'ям турбулентності.

Автомодельність області розвитку факела в діапазоні  $1,0 < \alpha < \alpha_{кр}$ , де його повна довжина практично не змінюється, можна пояснити сталою рівновагою темпу зростання швидкості згоряння і темпом зростання подачі палива в трубчастий модуль.

Збільшення далекобійності факела при досягненні стехіометричного співвідношення між паливом та повітрям ( $\alpha \rightarrow 1,0$ ) можна пояснити зниженням дії кінетичного фактора у зв'язку з баластуванням оболонки факела продуктами згоряння, зменшенням концентрації кисню в цій зоні і зниженням її температурного рівня через зростання хімічного недопалу палива.

В умовах збагаченого паливом режиму горіння ( $\alpha < 1,0$ ) поняття далекобійності факела втрачає фізичний сенс. Однак, такий режим має практичне застосування в топкової техніці при роботі факельних запальників, а при горінні збагаченого факела можлива реалізація стадійного горіння в якості ефективного методу зниження емісії токсичних оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) в продуктах згоряння основних паливкових пристроїв. Можливість стабільного спалювання палива при  $\alpha < 1,0$  (табл . 1.1) визначає перспективність застосування трубчастих модулів при

створенні факельних запальників.

Ефективне спалювання палива в широкому діапазоні коефіцієнта надлишку повітря в трубчастому модулі підтверджується результатами діагностики складу продуктів згоряння при спалюванні природного газу в трубчастому модулі з геометричними параметрами: діаметр повітряного каналу  $d_1 = 36$  мм, діаметр насадки Борда  $d_2 = 70$  мм, при числі газових отворів  $z_r = 6$ , їх діаметрі  $d_r = 3$  мм і швидкості витікання повітря з внутрішнього каналу  $W_b \approx 30$  м/с, які наведені в табл. 1.1.

Як видно з результатів діагностики складу продуктів згоряння, в області інтенсивного тепловиділення (зона а на рис. 1.6, а) зафіксовано мінімум суми паливних компонентів ( $\Sigma_{г.к} = \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ ) і відповідний цьому рівню мінімальний хімічний недопал палива ( $q_3$ ).

Експериментальні дослідження умов формування і розвитку дифузійного факела природного газу в одиночному трубчастому модулі вказують на існування чотирьох характерних режимів розвитку факела, серед яких можна виділити:

– регулярний режим, який реалізується в діапазоні низьких надлишків повітря ( $\alpha < 1,0$ ), характеризується зростанням далекобійності факела зі зменшенням коефіцієнта надлишку повітря або зі збільшенням відносної витрати палива ( $\bar{m}_r$ ), причому залежність  $\bar{l}_\phi = f(\bar{m}_r)$  має степеневий характер;

– перехідний режим, який характеризується появою кризи далекобійності факела за умови  $\alpha < 2,0$ ;

– автотодельний режим, що виникає при подальшому зменшенні коефіцієнта надлишку повітря, реалізується в діапазоні  $1,0 < \alpha < 1,8$ , де далекобійність факела ( $\bar{l}_\phi$ ) залишається практично постійною і для дослідженого типорозміру трубчастого модуля становить величину  $\bar{l}_\phi \approx 21,8$ ;

– стехіометричний режим, що виникає при  $\alpha \rightarrow 1,0$  і переходить при подальшому зниженні надлишку повітря в режим горіння збагаченого факела, де поняття далекобійності факела втрачає фізичний сенс.

Таблиця 1.1.

**Результати діагностики складу горючих газів в продуктах згоряння дифузійного трубчастого модуля**

Показник	Режим <sup>1</sup>								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коефіцієнт надлишку повітря, $\alpha$	1,05	1,07	1,1	1,54	2,27	2,46	3,64	5,14	7,81
Оксид карбону (CO), % об	0,028	0,008	0,048	0,001	0,21	0,16	0,35	0,38	0,28
Водень (H <sub>2</sub> ), % об			0,003		0,21	0,16	0,35	0,38	0,28
Метан (CH <sub>4</sub> ), % об			0,032		0,066	0,012	0,03	0,03	0,025
Сума пальних $\Sigma_{г.к}$ , % об	0,028	0,008	0,083	0,001	0,35	0,25	0,04	0,41	0,305
Химичний недопал, $q_3$ , %	0,085	0,009	0,0025	0,0015	3,15	3,14	4,43	6,85	7,73

<sup>1</sup>Режими 1, 2 і 4 виконані при використанні газоаналізатора TESTO 30, а решта – при використанні газоаналізатора «ГАЗОПРОМ»

Існування чотирьох режимів горіння факела в трубчастому модулі є додатковим підтвердженням універсальності практичного використання трубчастої технології спалювання газу, яка може бути реалізована в широкому діапазоні зміни надлишків повітря (від  $\alpha < 1,0$  до  $\alpha \rightarrow 7,0$  і вище).

Серед різних типів трубчастих пальникових пристроїв застосування знаходять, головним чином, пальники з поздовжньою подачею палива в зону горіння. В цьому випадку реалізується режим горіння близький до дифузійного, який характеризується відносно довгим факелом. Для здійснення спалювання палива з підвищеним ступенем кінетичності і відповідно порівняно коротким факелом представляють значний інтерес циліндричні стабілізаторні пальникові пристрої з попереднім або неповним попереднім змішуванням палива і окиснювача.

## 1.2. Аналіз різних способів інтенсифікації процесів спалювання палива в стабілізаторних пальникових пристроях

Згідно з виконаним аналізом наведених в літературі даних (див. наприклад [20-38]) про способи інтенсифікації процесу горіння в пальникових пристроях стабілізаторного типу можна виділити такі (рис. 1.7):

- організація надійного запалювання, що забезпечує стійкий процес горіння за максимально великих швидкостей повітря або газоповітряної суміші;
- попередній підігрів повітря, що подається на горіння, а також газоподібного палива при спалювання низькокалорійних газів;
- струменева газороздача в потік повітря під певним кутом;
- закручення повітряного потоку;
- організація відповідних швидкостей газу і повітря з вибором розміру і місця розташування отворів з метою отримання бажаної інтенсивності сумішоутворення і горіння;
- розвиток периметра запалювання для отримання відповідно розвиненої поверхні запалювання і горіння (мікрофакельне, мікродифузійне горіння з використанням важкообтічних тіл - стабілізаторів);



Рис.1.7. Основні способи інтенсифікації процесів горіння.

- подача додаткового повітря в корінь дифузійного факела;
- використання модульної конструкції пальникового пристрою;
- підвищення коефіцієнта загромодження прохідного перерізу пальника;
- подача додаткового повітря в зону рециркуляції;
- зменшення розмірів зони рециркуляції продуктів реакції в топковій камері до розміру і потужності, які забезпечують достатню стабільність факела;
- підвищення турбулентності потоків з метою інтенсифікації вигорання;
- використання турбулізуючих решіток перед пальниковими пристроями;
- підвищення турбулентності потоку в зоні горіння з метою інтенсифікації процесу горіння за рахунок використання додаткових турбулізуючих елементів (турбулізатори потоку різної конфігурації, полум'яперекидні перемички та ін.).

У даній роботі розглядаються, головним чином, можливості інтенсифікації спалювання палива в пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я, які пов'язані із застосуванням нішових порожнин, встановленням на зривний кромці стабілізаторів плоских турбулізаторів потоку, а також віддаленням газоподавальних отворів від устя пальника.

### 1.3. Комп'ютерне моделювання процесів переносу при горінні газоподібного палива

Одним з найважливіших аспектів у розрахункових дослідженнях турбулентного горіння газоподібного палива є вибір підходу до моделювання власне турбулентного переносу. На сьогоднішній день розроблено досить велику кількість методів розрахунку турбулентних потоків (див., наприклад, [39-79]). Зупинимося далі на розгляді основних сучасних підходів у математичному моделюванні турбулентності.

Істотна передумова CFD-моделювання турбулентних потоків полягає в припущенні про прийнятність рівнянь Нав'є-Стокса для опису турбулентних течій і передбачення їх миттєвих характеристик (розглядаються статистичні властивості ансамблю течій при макроскопічно однакових зовнішніх умовах). Припущення про застосовність рівнянь Нав'є-Стокса для інтерпретації турбулентного руху

підтверджується численними дослідженнями [75, 76].

Серед підходів до математичного моделювання турбулентних течій зазвичай виділяють пряме чисельне моделювання (Direct Numerical Simulation, DNS), моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation, LES), розв'язок осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS). Є також комбіновані підходи, що поєднують в собі ті чи інші риси DNS, RANS и LES, наприклад, метод моделювання відокремлених вихорів (Detached Eddy Simulation, DES), і ряд інших, які не мають належного фізичного обґрунтування і тому не отримали широкого поширення. На рис. 1.8 схематично наводиться класифікація методів моделювання турбулентних течій.

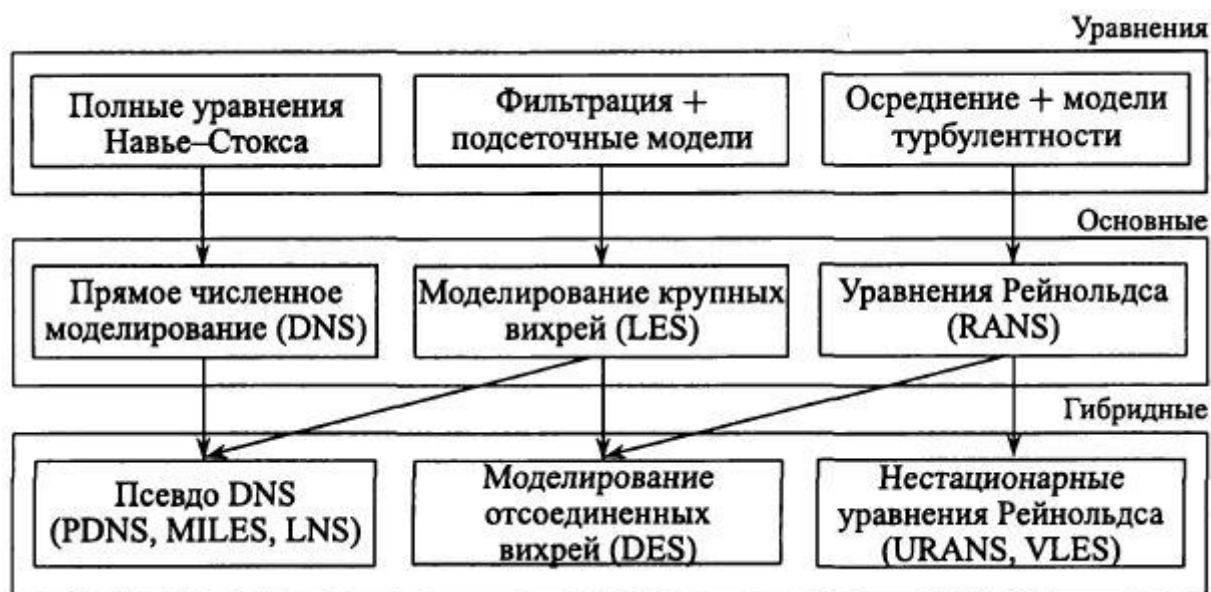


Рис. 1.8. Методи моделювання турбулентних течій [42].

Метод прямого чисельного моделювання передбачає розв'язання повних (нестационарних і трьохмірних) рівнянь Нав'є-Стокса. В рамках такого підходу розв'язуються всі масштаби турбулентного руху, що дозволяє розрахувати амплітудно-частотні і середні характеристики потоку за допомогою осереднення за досить довгим (статистично презентабельним) інтервалом часу. Однак, для використання DNS потрібні потужні обчислювальні ресурси, а можливості його застосування обмежуються розрахунками течій з досить простою геометрією і порівняно малими числами Рейнольдса (порядку  $10^3 - 10^4$ ).

Підхід заснований на розв'язанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса вимагає набагато менших обчислювальних ресурсів. В рамках RANS моделюється внесок в середній рух всіх масштабів турбулентності. Даний метод успішно застосовується в практичних розрахунках. Важливо підкреслити, що моделі турбулентності, які використовуються для замикання рівнянь Рейнольдса не володіють прийнятною універсальністю, а отже не можуть бути застосованими для вирішення широкого кола прикладних задач. Це відноситься до течій з відривом потоку і ряду інших течій, для яких характерною є наявність відносно стійких трьохмірних і нестационарних структур з розмірами порядку макромасштабу потоку (такі структури називаються когерентними, а течії, в яких вони відіграють істотну роль — автоколивальними). До числа прикладів автоколивальних турбулентних течій відносяться течія в сліді за важкообтічним тілом (доріжка Кармана), бафтинг (виникнення великомасштабних коливань стрибка ущільнення при надзвуковому обтіканні крила під певним кутом атаки) та інші. Компромісним варіантом між DNS і рішенням RANS є метод моделювання великих вихорів. В даному підході дослідження течій обмежується масштабами, що перевищують деяку задану величину (ширину фільтра). Метод LES базується на розв'язанні фільтрованих по простору рівнянь Нав'є-Стокса, і розв'язується рух тільки великих вихорів. Масштаби великих вихорів визначаються граничними умовами задачі (розміри найбільших вихорів можна порівняти з характерним масштабом задачі). Великомасштабні компоненти турбулентності утворюються з середньої течії при подоланні в'язких або рейнольдсових напружень.

Більш універсальну структуру мають дрібні вихори (короткохвильова частина спектра). Їх характеристики визначаються швидкістю дисипації кінетичної енергії і в'язкістю і порівняно слабо залежать від геометрії течії і зовнішніх умов і моделюються за допомогою моделей підсіткового масштабу (Sub-Grid Scale, SGS), побудованих на основі концепції вихрової в'язкості або інших раціональних наближень процесів переносу. На практиці потрібне застосування досить дрібних сіток, що забезпечують розділення великих вихрових структур, що лежать поза інерційного інтервалу, який задовольняє закону «п'яти третин». Оскільки діапазон



масштабів вихорів, представлених в турбулентному потоці, збільшується з ростом числа Рейнольдса, то його підвищення обумовлює необхідність використовувати все більш детальну сітку. Метод DES є гібридом традиційних рівнянь Рейнольдса, що використовуються в пристінковій області (наприклад, в області приєднаного приграничного шару), де кроку сітки недостатньо для розв'язання великих вихорів, і методу моделювання великих вихорів, який застосовується у відривних зонах з характерними для них великомасштабними вихровими структурами.

Поряд з DNS і LES, знаходить застосування метод псевдо - або квазі-прямого чисельного моделювання (Pseudo або Quasi DNS, PDNS або QDNS), а також монотонний метод моделювання великих вихорів (Monotonically Integrated LES, MILES), в яких підсіткові моделі не використовуються, а дисипативні процеси впроваджуються за допомогою спеціально сконструйованих різницевих схем [77, 78].

Підхід URANS (Unsteady RANS), в якому розв'язуються нестационарні рівняння Рейнольдса, зазвичай розглядається як узагальнення методу RANS. Даний підхід є більш економічним і менш чутливим до сітки, ніж LES або DES. Однак надійне теоретичне обґрунтування застосовності URANS для опису турбулентних течій відсутнє (при виведенні рівнянь Рейнольдса використовується осереднення за інтервалом часу, який набагато перевищує характерні часи всіх турбулентних пульсацій). Застосування нестационарної форми рівнянь Рейнольдса є виправданим за наявності зовнішніх нестационарних впливів (у разі нестационарних граничних умов).

Обчислення з використанням нестационарних рівнянь Рейнольдса на порівняно дрібній сітці дозволяють розв'язувати великомасштабні вихрові структури і відстежувати їх розвиток у часі. У деяких джерелах метод URANS інтерпретується як спрощений метод моделювання великих вихорів (Very Large Eddy Simulation, VLES). Однак трактування URANS як однієї з модифікацій LES не відповідає фізичній сутності цього методу. У ряді інших робіт метод VLES трактується трохи інакше. На відміну від RANS, у VLES використовується потрійне розкладання миттєвих значень шуканих функцій на середню,

некогерентну і когерентну складові, що ставить його в один ряд з підходом, розглянутим в [79]. У розрахунковій практиці VLES застосовується для моделювання течій з великомасштабними когерентними вихровими структурами, а також передбачення флуктуацій тиску в закручених потоках, наприклад, в газових пальниках і форсунках. Результати розрахунків досить добре узгоджуються з даними вимірювань і розрахунками, виконаними за допомогою різних моделей турбулентності.

Трактування різних методів моделювання турбулентного переносу зручно пояснити на основі умовного розподілу кінетичної енергії турбулентності по хвильових числах (рис. 1.9), а також співвідношення між частинами спектра, що розв'язується і моделюється в різних підходах.

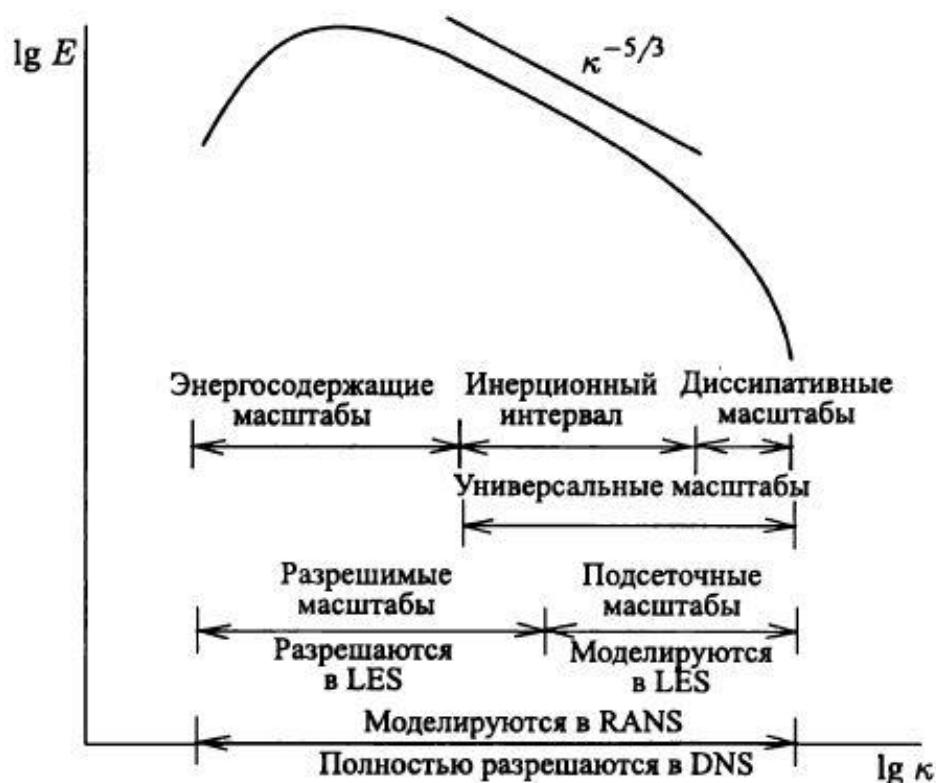


Рис. 1.9. Спектр кінетичної енергії турбулентності і трактування різних підходів до моделювання турбулентних течій [42].

Спектр кінетичної енергії турбулентності характеризується досить протяжною і прямолінійною ділянкою, що описує закон «п'яти третин» (інерційний інтервал).

При розв'язанні усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса

моделюється весь спектр масштабів, в той час як в методі моделювання великих вихорів розраховується тільки його частина, відповідна розмірам вихорів, що не перевищують ширину фільтра.

Області застосування перерахованих підходів цілком визначилися, а отримані результати дозволяють дати оцінку меж застосовності, можливостей і перспективності кожного з них, а також обчислювальних ресурсів, необхідних для реалізації того чи іншого підходу.

Відповідно до проведеного аналізу літературних даних, математичне моделювання процесів турбулентного горіння стає все більш поширеним інструментом для поглибленого аналізу різних завдань спалювання палива (див. [80-138]).

Ключовим питанням при моделюванні турбулентного горіння є знаходження статистики реагуючих скалярів. Традиційна стратегія заснована на усередненні в рамках RANS підходу. Проте, LES та інші методи все більш широко застосовуються при моделюванні турбулентного горіння. При цьому основні труднощі розрахунків на основі різних підходів принципово схожі. Процедура усереднення в часі (RANS) або фільтрація (LES) призводять до проблеми замикання для істотних величин в балансових співвідношеннях, включаючи, зокрема, хімічні джерельні члени. Детальному аналізу різних сучасних підходів до вирішення питань замикання при розрахунках турбулентного горіння присвячені, наприклад, роботи [80-88].

В оглядовій роботі Білгера та ін. [88] обговорюються традиційні парадигми моделювання турбулентного горіння, які визначилися приблизно протягом останніх 40 років. Принципові стратегії, засновані на цих парадигмах, базуються на: 1) поділі масштабів (просторових і часових) і/або 2) поділі елементів моделі, які відповідають опису моментів реактивних скалярів через значення скалярів в просторі станів системи і моделі для функції розподілу ймовірності (PDF (Probability Density Function) або щільності ймовірності FDF (Filtered Density Function)). Приклади моделей, заснованих на поділі масштабів включають припущення про швидку хімію (наприклад, модель дисипації вихорів (EDM) [135],

модель руйнування вихору (EBU) [136]) і модель ламінарних флеймлетів [137], де товщина полум'я менше енергонесучих масштабів турбулентності.

Щодо другої стратегії, то усереднені або відфільтровані реакції описуються через середньозважені миттєві швидкості реакції і відповідні функції розподілу. Для знаходження миттєвої швидкості реакції необхідна модель "реактора", що представляє простір можливих станів системи. Наприклад, бібліотека флеймлетів або СМС (Conditional Moment Closure) рішення можуть бути моделями такого реактора. Для визначення функцій розподілу можуть використовуватися різні підходи залежно від характеру опису змінних простору стану. Наприклад, в стандартній моделі ламінарних флеймлетів для попередньо не перемішаної суміші або в СМС, моделі для змінної змішування та її дисперсії можуть бути використані для вибудовування PDF функцій для реагуючих скалярів. У моделі BML (Bray-Moss-Libby) PDF функція представлена через змінну прогресування реакції (reaction progress variable) для попередньо перемішаного полум'я. Більш загальний підхід до визначення функції PDF пов'язаний з розв'язанням рівняння переносу для PDF або FDF. Можуть застосовуватися також і проміжні стратегії. Вони включають 1) вибудовування PDF/FDF функцій використовуючи незалежне стохастичне моделювання, або 2) PDF на основі статистично найбільш ймовірного розподілу [138]. Так, в МСА (Mapping Closure Approach) підході рівняння переносу для PDF використовується для визначення статистичного розподілу, а СМС застосовується для опису простору станів системи.

В останній період одним з широко використовуваних підходів при моделюванні турбулентного горіння є флеймлет підхід. Для горіння попередньо не перемішаних сумішей він заснований на описі турбулентного полум'я як ансамблю елементарних ламінарних полум'їв, вкладених в турбулентний потік і взаємодіючих з ним. Приймається, що локальна структура полум'я в кожній точці фронту полум'я подібна ламінарному флеймлету, тоді як взаємодія з турбулентним потоком зводиться до еволюції фронту полум'я. Такий розгляд пов'язаний з введенням змінної змішування, яка дозволяє розділити турбулентний перенос та структуру полум'я. Ключовим параметром структури флеймлета є швидкість

скалярної дисипації (scalar dissipation rate), який відповідає за потоки реагентів в зону реакції і пов'язаний з градієнтами швидкостей. Далі функція розподілу ймовірності використовується для опису турбулентного полум'я і пов'язує ламінарні флеймлети з фронтом турбулентного полум'я.

У цій роботі математичне моделювання турбулентного горіння базується на застосуванні флеймлет підходу.

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

Виконаний аналіз публікацій, що стосуються даної тематики, свідчить про важливість проведення досліджень робочих процесів в пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я.

До основних задань дослідження можуть бути віднесені такі:

1. Виконати порівняльний аналіз основних особливостей протікання робочих процесів гладких циліндричних і плоских пальникових пристроїв стабілізаторного типу.
2. Для типоряду пальникових пристроїв з гладким циліндричними стабілізаторами:
  - встановити основні закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача і формування температурних полів в зоні горіння;
  - визначити межі стійкої роботи пальникових пристроїв;
  - виконати аналіз можливостей регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача за допомогою зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника.
3. Щодо типоряду циліндричних пальникових пристроїв з кільцевими нішами:
  - визначити на основі моделювання структури течії в нішових площинах, їхні раціональні геометричні характеристики;
  - виконати дослідження особливостей аеродинаміки змішування палива й окиснювача та теплового стану продуктів горіння.

4. Для типоряду циліндричних пальникових пристроїв з пластинчастими турбулізаторами потоку, встановленими на зривних кромках стабілізаторів:
  - провести аналіз картини течії, сумішоутворення і температурних режимів зони горіння;
  - виконати зіставлення основних характеристик робочих процесів пальникових пристроїв за наявності та відсутності турбулізаторів потоку.
5. Розробити рекомендації щодо використання різних модифікацій циліндричних пальникових пристроїв стабілізаторного типу.

#### 1.5 Висновки за розділом.

За матеріалами першого розділу роботи можна зробити такі висновки:

1. Виконано огляд стану досліджень процесів тепломасопереносу в циліндричних пальникових пристроях різного типу. Особливу увагу приділено розгляду робочих процесів в пальниках трубчастого типу на базі циліндричних каналів з розширенням. Проведено аналіз різних підходів до моделювання турбулентних течій та основних сучасних моделей горіння.

2. За результатами проведеного огляду визначено основні завдання дослідження. Відзначається перспективність дослідження робочих процесів циліндричних пальникових пристроїв різних модифікацій - гладких, з кільцевими нішами, а також з пластинчастими турбулізаторами потоку.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ ПОЛУМ'Я

У даному розділі розглядаються особливості методики комп'ютерного моделювання, наводиться формулювання математичної моделі процесу, що досліджується, та висвітлюються питання, що стосуються верифікації моделей турбулентного переносу і обґрунтування достовірності результатів розрахункових досліджень.

Також наводиться опис експериментального стенду і особливостей методики експериментальних досліджень.

#### 2.1. Математична постановка задачі

Досліджуються процеси тепломасопереносу в умовах спалювання природного газу в пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я. При цьому розгляду підлягали три модифікації пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я різної конфігурації: (рис. 2.1):

- гладкими;
- з кільцевими прямокутними нішами;
- з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках стабілізаторів.

Циліндричний стабілізатор полум'я розташовується в циліндричному каналі, на вхід якого подається повітря. Газ, що підлягає спалюванню, через систему отворів на бічних поверхнях стабілізаторів подається проникненням в зносячий потік повітря.

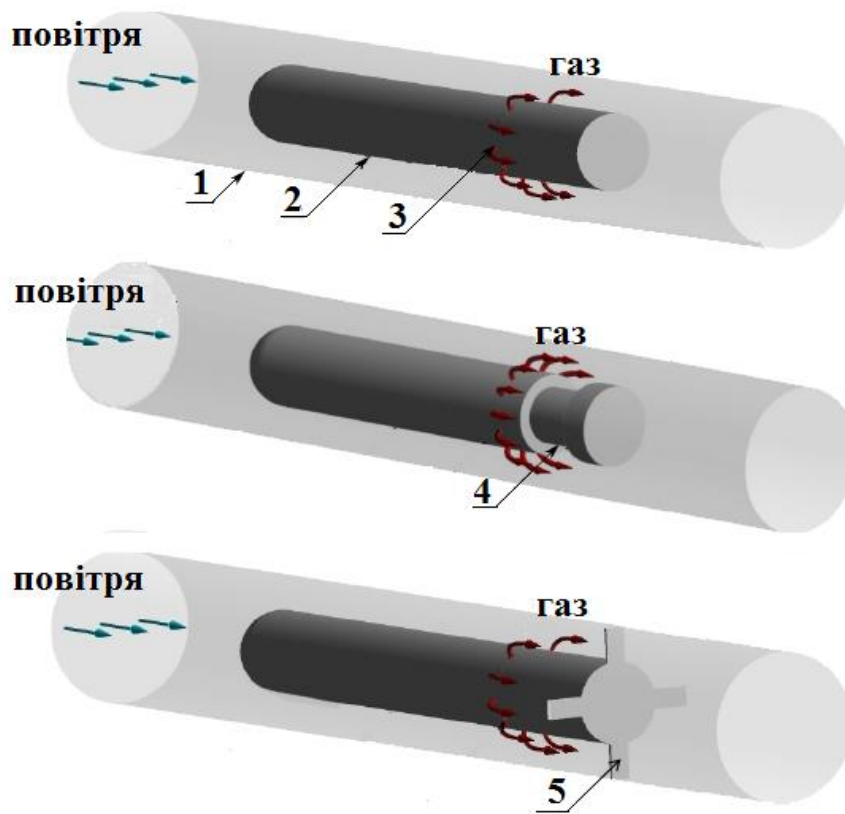


Рис. 2.1. Схеми пального пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я різної конфігурації: гладкими (а); з кільцевими нішовими порожнинами на бічних поверхнях стабілізаторів (б); з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках стабілізаторів (в); 1 – циліндричний канал; 2 – циліндричний стабілізатор; 3 – газоподавальні отвори; 4 – кільцева ніша; 5 – пластинчасті турбулізатори потоку.

Математична постановка даної задачі тепломасопереносу має вигляд:

рівняння руху

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \cdot \vec{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot (S^*), \quad (2.1)$$

рівняння неперервності

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0, \quad (2.2)$$



рівняння енергії для реагуючих турбулентних потоків

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho I) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} I) = -\nabla \cdot \vec{q}_{\Sigma} + q_V, \quad (2.3)$$

рівняння збереження маси  $i$ -го хімічного компоненту

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.4)$$

рівняння стану для багатоконпонентної суміші

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_i^N \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (2.5)$$

де  $\vec{U}$  – вектор швидкості;  $\tau$  – час;  $P$  – статичний тиск;  $S^*$  – тензор напружень, що враховує в'язкі напруження та додаткові напруження, що обумовлені турбулентністю;  $\rho$  – густина;  $\vec{q}_{\Sigma}$  – сумарний тепловий потік, що включає потік теплопровідністю та додатковий потік, який викликаний турбулентними пульсаціями;  $q_V$  – джерельний член, що враховує теплоту хімічних реакцій і переносу теплоти радіацією;  $I$  – загальна ентальпія,  $I = \sum_i Y_i I_i$  (тут  $I_i$ ,  $Y_i$  – ентальпія та масова концентрація  $i$ -го компонента);  $R_i$  – джерельний член, що враховує швидкість утворення  $i$ -ого компонента в хімічній реакції;  $\vec{J}_i$  – потік маси  $i$ -го компонента, що обумовлений дифузією і турбулентним переносом;  $M_i$  – молекулярна маса  $i$ -го компонента;  $N$  – кількість компонентів суміші;  $T$  – абсолютна температура;  $R$  – універсальна газова стала.

Щодо граничних умов для наведеної вище системи рівнянь, то вони визначалися наступним чином. У перерізах, що відповідають входу в канал

пальникового пристрою та в газоподавальні отвори, задавалися постійні значення швидкостей, концентрацій, температур та ін. У вихідному перерізі каналу пальникового пристрою ставилися так звані «м'які» граничні умови – рівність нулю позовжніх похідних всіх залежних змінних. На непроникних граничних поверхнях каналу і стабілізаторів задавалися умови «прилипання». На бічних поверхнях каналу приймалися граничні умови другого роду.

## 2.2 Верифікація моделей турбулентного переносу та аналіз достовірності даних комп'ютерного моделювання

У роботі були виконані дослідження з верифікації моделей турбулентного переносу. Вибір моделі, найбільш адекватної розглянутій фізичній ситуації, базувався на зіставленні результатів проведених експериментів і комп'ютерного моделювання з використанням різних замикаючих моделей. При цьому розглядалися два підходи до моделювання турбулентних течій – RANS і DDES.

На рис. 2.2 і в табл. 2.1 представлено результати, що стосуються вибору моделі турбулентності. Згідно з отриманими даними, найменші відносні відхилення результатів експериментальних і розрахункових досліджень мають місце при використанні SST –  $k-\omega$  моделі турбулентності в разі DDES підходу і RNG  $k-\varepsilon$  моделі – в разі RANS підходу. При цьому зазначені відхилення для DDES і RANS підходів відрізняються порівняно незначно при дослідженні течії палива і окиснювача. Дані відхилення помітно зростають при дослідженні температурних режимів зони горіння.

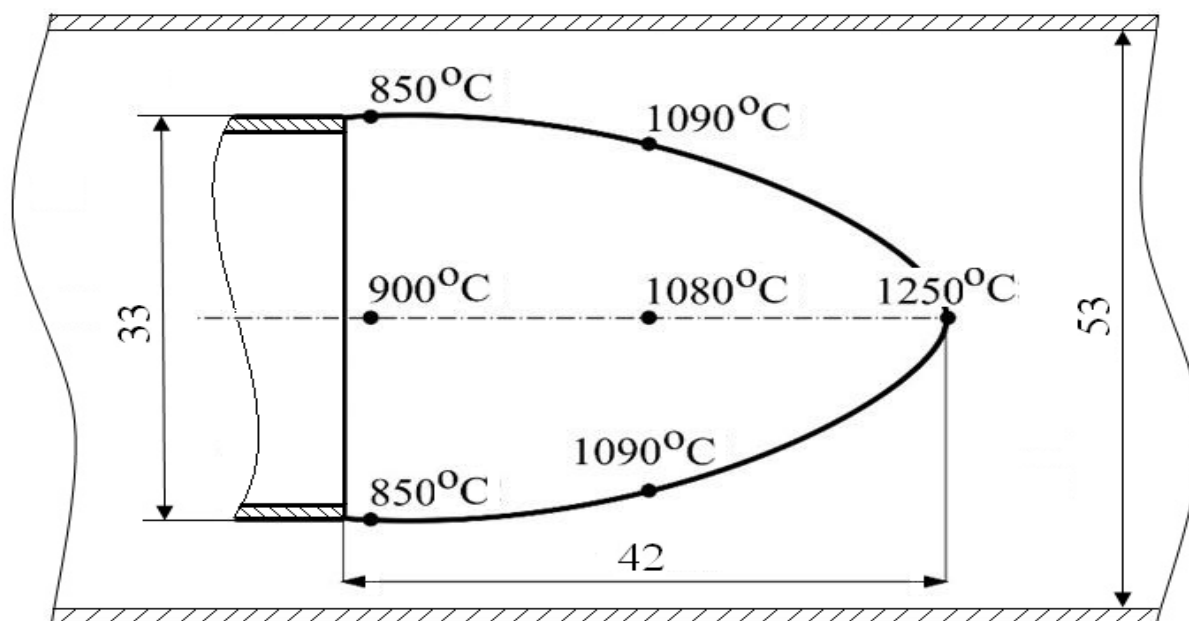


Рис. 2.2. Експериментальні значення температур в зоні зворотних токів за зривною кромкою стабілізатора.

Достовірність результатів комп'ютерного моделювання базується на зіставленні даних виконаних експериментальних і розрахункових досліджень, а також на порівнянні з розв'язками, що отримані методом прямого чисельного моделювання (DNS). На рис. 2.3 и 2.4 до прикладу представлено експериментальні та розрахункові значення температур в характерних точках зон зворотних токів в закормових областях стабілізаторів. Максимальна відносна похибка чисельної моделі для даної ситуації склала приблизно 10%. Порівняння розв'язку задачі витікання круглого струменя в зносячий потік, який одержано методом прямого чисельного моделювання (DNS) (дані Мупніді і Махеша) та чисельного розв'язку на основі DDES підходу також показали їх задовільне узгодження.

Достовірність наукових положень і висновків, які захищаються, підтверджується також досвідом впровадження розроблених пального пристроїв.

Таблиця 2.1.

**Відносні відхилення  $\delta$  результатів експериментальних і розрахункових досліджень для різних моделей турбулентності, %**

Параметри	DDES метод			RANS метод				
	SST $\kappa\text{-}\omega$	Realizable $k\text{-}\epsilon$	SA	Realizable $k\text{-}\epsilon$	RNG $k\text{-}\epsilon$	Standard $\kappa\text{-}\omega$	SST $\kappa\text{-}\omega$	BSL $\kappa\text{-}\omega$
Довжини зон зворотних токів	6,8	7,0	7,3	8,4	7,5	40,9	9,1	10,4
Максимальна температура в зоні зворотних токів	9,1	9,8	10,1	13,1	12,0	17,3	16,1	16,2
Мінімальна температура в зоні зворотних токів	10,0	10,4	10,7	13,7	12,4	17,9	15,8	15,6

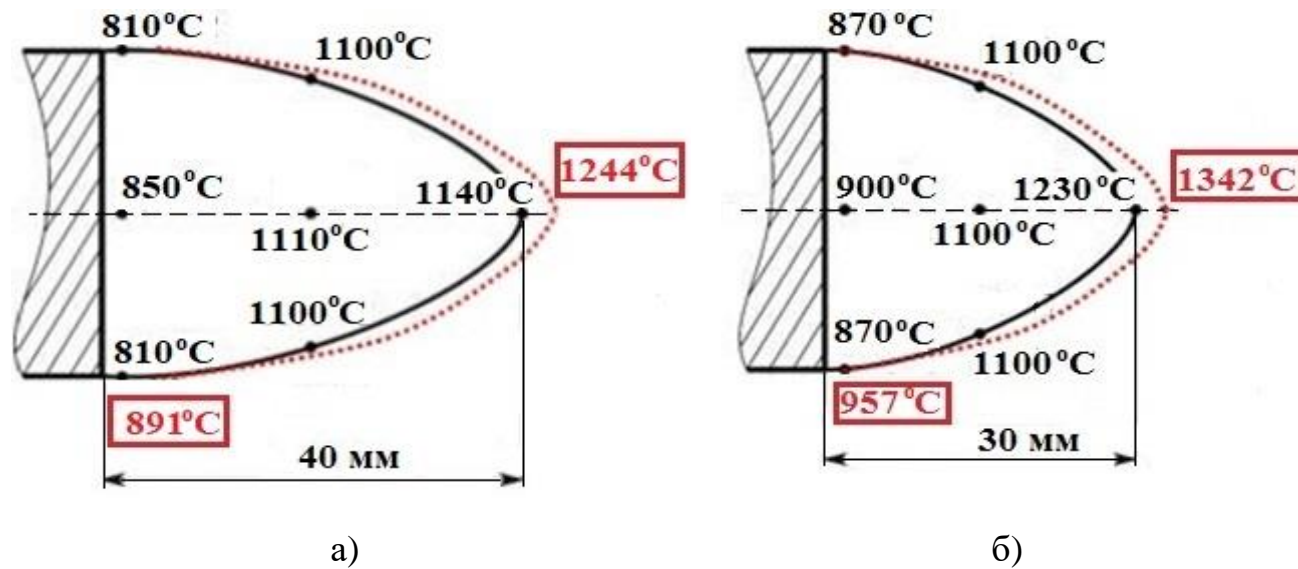
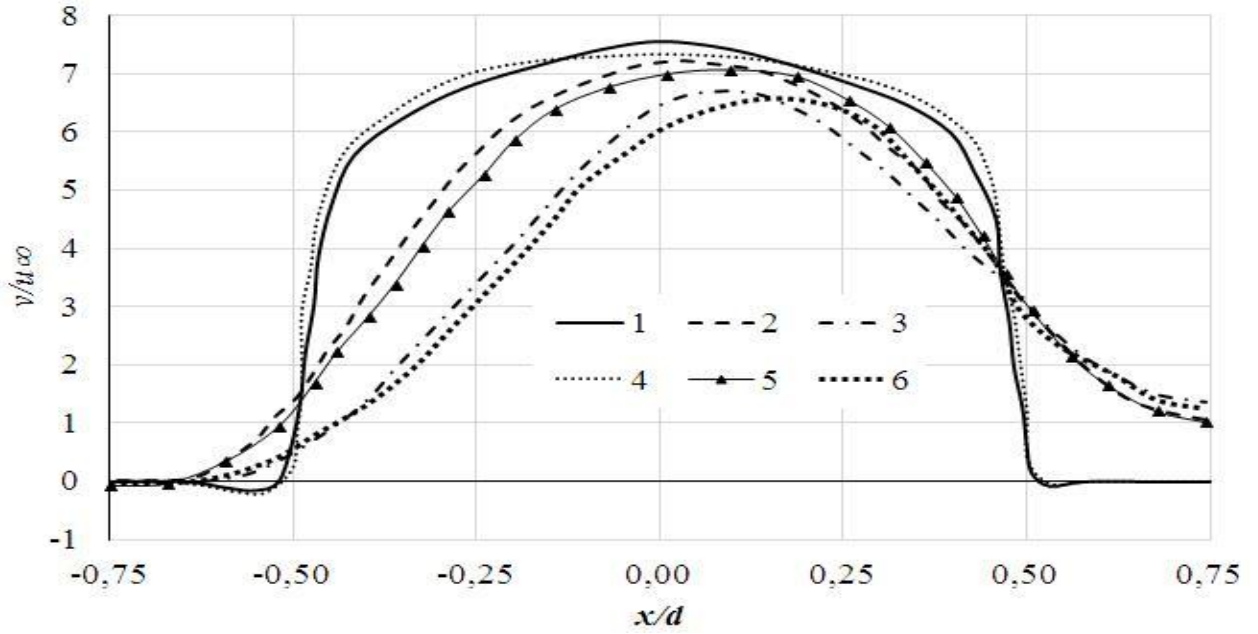
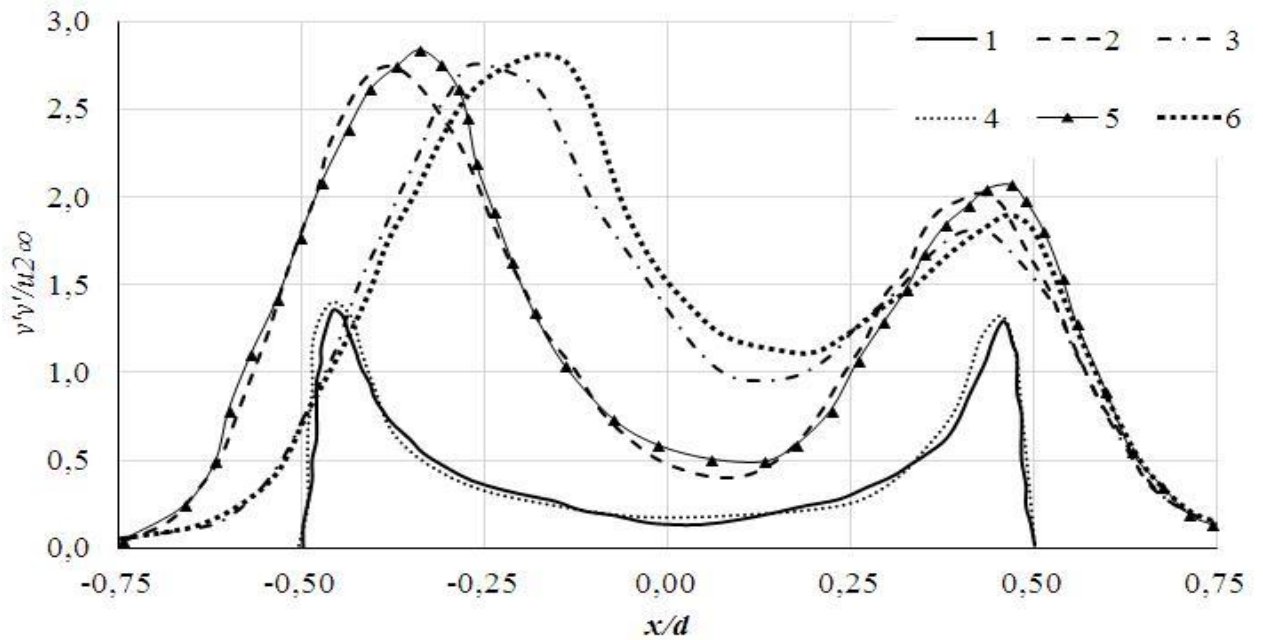


Рис.2.3. Значення температур у характерних точках зони зворотних токів у закормовій області циліндричного стабілізатора полум'я за даними експериментальних і розрахункових (у прямокутниках) досліджень при  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $U_{\Pi}^{\text{вх}} = 10$  м/с ;  $\alpha = 6,72$  для  $S/d = 1,5$  (а) та  $S/d = 5$  (б).



а)



б)

Рис. 2.4. Розподіли швидкості (а) та інтенсивності турбулентності (б) за діаметром струменя, отримані методом прямого чисельного моделювання DNS і DDES. Дані С. Муппіді та К. Махеша на основі DNS методу (1,2,3) і результати розрахунків на основі DDES підходу (4,5,6) : 1,4 –  $y/d=0$ ; 2,5 –  $y/d=2,0$ ; 3,6 –  $y/d=3,0$ .

### 2.3 Особливості методики експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження робочих процесів в циліндричних пальникових пристроях проводилося на стенді, який представлено на рис. 2.5.

Функціонування стенду здійснюється таким чином. Повітря від вентилятора 1 подається до «заспокійливої» ділянки 3, що обладнана звужувальним пристроєм 4, що дозволяє вимірювати витрати. Вентилятор в схемі обладнаний частотним регулятором, що дозволяє регулювати витрати повітря без застосування шибєрної заслонки. Після «заспокійливої ділянки» повітря підводиться до робочої ділянки 7, футерованої вогнетривким матеріалом. Для забезпечення вимірювань у факелі робочу ділянку обладнано дифманометром для визначення перепаду тиску в досліджуваному модулі 6. Конструкція стенду дозволяє проводити швидку заміну досліджуваних циліндричних модулів. Температура елементів вимірюється термопарами 8. Температура повітря вимірюється термометром 2. Газовий тракт обладнаний манометром і дифманометром для вимірювання тиску газу перед діафрагмою і перепадів тиску на діафрагмі. Для підпалювання суміші використовується електричний запальник напругою 27 В.

На рис. 2.6 наведено фореєстрацію факела на експериментальному стенді.

У роботі певна увага приділялася дослідженню стійкості факела за циліндричними стабілізаторами полум'я.

Межі стійкої роботи пальника - коефіцієнт надлишку повітря при запалюванні факела на «бідному» зриві і «багатому» зриві, тобто залежність цих коефіцієнтів від швидкості повітря, наприклад,  $\alpha^{\text{зап}} = f(W_{\text{п}})$ ,  $\alpha^{\text{max}} = f(W_{\text{п}})$ ,  $\alpha^{\text{min}} = f(W_{\text{п}})$ , визначаються наступним чином.

Вмикається компресор подачі основного повітря і встановлюється мінімальна витрата повітря через пальник за можливостями системи регулювання або отриману під час налагоджувальних випробувань пальника.

Запалюється допоміжний запальник за відповідною програмою. Витрату повітря і газу через допоміжний запальник встановлюють за результатами налагоджувальних випробувань. Подається напруга на свічку запальника.

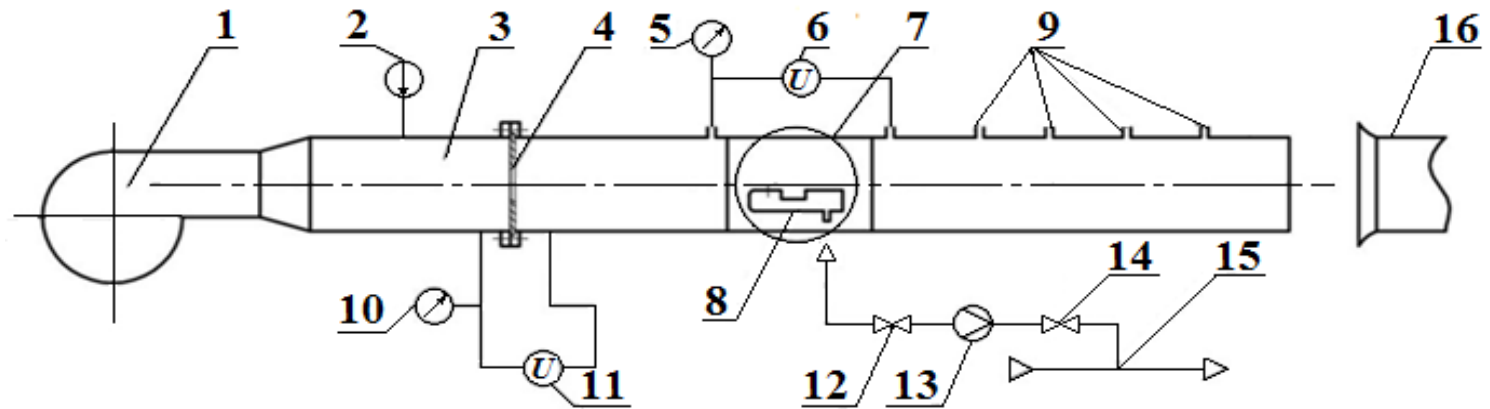


Рис. 2.5. Схема експериментального стану: 1 – вентилятор; 2 – термометр для вимірювання температури повітря; 3 – початкова ділянка; 4 – звужуючий пристрій; 5 – манометр вимірювання тиску на вході в мірну ділянку; 6 – дифманометр вимірювання опору випробовуваних циліндричних модулів; 7 – мірна ділянка, обладнана доступом для зондів відбору проб газового аналізу та вимірювальної апаратури, а також свічкою запалення; 8 – циліндричний стабілізатор; 9 – штуцери для відбору проб по довжині факела; 10 – манометр вимірювання тиску перед діафрагмою; 11 – дифманометр вимірювання перепаду тиску на діафрагмі; 12 – регулюючий газовий вентиль; 13 – мірна діафрагма витрати газу; 14 – запірний вентиль; 15 – газова магістраль; 16 - вхід в газовідвідний тракт.



До пального пристрою, який випробується, подається газ до моменту появи полум'я за стабілізаторами. Визначається витрата газу на палик ( $V_{\Gamma}^H$ )<sup>заг</sup> в момент загоряння факела.

Визначення межі «бідного» зриву  $\alpha^{max}$  виконується наступним чином. Вимикається допоміжний палик. Поступово зменшується витрата газу до моменту зриву факела – фіксується  $V_{\Gamma}^{min}$ .

Визначення характеристик «бідного» зриву –  $\alpha^{min}$  виконується після займання основного факела за стабілізатором шляхом поступового збільшення витрати газу при вимкненому допоміжному палику. За «багатий» зрив, як правило, приймається факт виникнення сильних пульсацій.

Виконуються операції запалювання «бідного» і «багатого» зривів факела при поступовому збільшенні витрати повітря через основний палик до максимальної за вимогами до палика або за можливостями стенду.

#### 2.4. Висновки за розділом

До основних результатів за даним розділом відносяться такі:

1. Виконано дослідження з верифікації моделей турбулентного переносу. Встановлено, що найкраще узгодження експериментальних і розрахункових даних має місце при використанні SST  $k-\omega$  моделі турбулентності в разі DDES підходу і RNG  $k-\varepsilon$  моделі- в разі RANS підходу.
2. Представлено опис конструкції і особливостей функціонування експериментального стенду. Висвітлено питання методики проведення експериментів.
3. Виконано дослідження з визначення достовірності результатів комп'ютерного моделювання процесів переносу в аналізованих фізичних ситуаціях на основі зіставлення даних розрахункових досліджень з результатами експериментів і чисельних рішень, отриманих, методом прямого чисельного моделювання (DNS).



Рис. 2.6. Фотореєстрація факела на експериментальному стенді.

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ З ГЛАДКИМИ ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ ПОЛУМ'Я

3.1. Порівняльний аналіз закономірностей протікання робочих процесів у пальниках з циліндричними і плоскими стабілізаторами полум'я

В даному підрозділі на основі математичного моделювання для пальникових пристроїв стабілізаторного типу потужністю 90 кВт проведено порівняльний аналіз характеристик ізотермічної течії та перемішування палива й окиснювача для ситуацій, що відповідають використанню як стабілізаторів полум'я циліндричного та плоского тіла. На рис. 3.1 наведено схеми пальникових пристроїв, що розглядаються, з циліндричним та плоским стабілізаторами полум'я. Утворення горючої суміші у пальниках здійснювалося шляхом струменевого введення палива в зносячий потік окиснювача з бокових поверхонь стабілізаторів. Витрата природного газу в досліджуваних ситуаціях складала  $G_r = 9 \text{ м}^3/\text{год}$ , а коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ . Для пальникових пристроїв, що порівнювалися, приймалася рівність діаметра циліндричного та висоти плоского стабілізаторів полум'я  $d_{ст} = 35 \text{ мм}$ , а також площ їх поперечних перерізів. Однаковим приймався також коефіцієнт загромадження прохідного перерізу каналу  $k_f = 0,3$ . Зазначені умови забезпечували рівність середньої швидкості набігаючого повітряного потоку в зазорах між стабілізаторами та стінками каналів. Діаметр газоподавальних отворів  $d$  і відносний крок  $S/d$  їх розташування для обох ситуацій вибиралися таким чином, щоб глибина проникнення струменів газу дорівнювала приблизно 0,75 від висоти зазору. Знайдені відповідно до цієї умови значення  $d$  для ситуацій циліндричного і плоского стабілізаторів становили 3 мм і 2,3 мм, а величини  $S/d$  – 3,05 і 5,97. Інтенсивність турбулентності потоку повітря на вході в канал і газу у вихідному перерізі газоподавального отвору приймалася рівною 3%. Абсолютна температура газу і повітря становила 293,15 К.

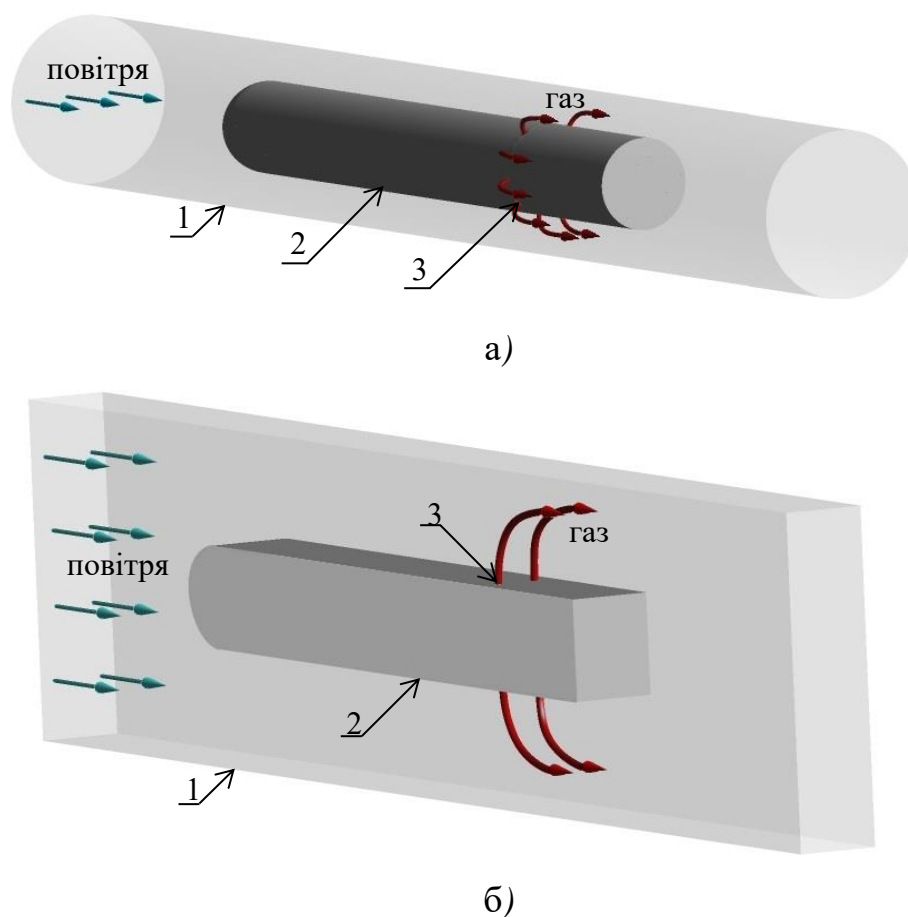


Рис. 3.1. Схема пального пристрою з циліндричним (а) і плоским (б) стабілізаторами полум'я: 1-канал; 2-стабілізатор полум'я; 3-газоподавальні отвори.

Обчислювальні експерименти проводилося в рамках RANS підходу до розрахунків турбулентних течій з використанням RNG  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності.

Основні результати математичного моделювання структури течії палива і окиснювача в досліджуваних стабілізаторних паликових пристроях ілюструють рис. 3.2-3.3. На рис. 3.4 - 3.5 представлено дані, щодо картини сумішоутворення в розглянутих паликах.

Згідно з виконаними дослідженнями, в ситуаціях, що зіставляються, характеристики циркуляційних течій в закормових областях стабілізаторів істотно відрізняються. Так, довжина зони зворотних токів за циліндричним стабілізатором в 1,8 рази менша, ніж за плоским стабілізатором. При цьому значення модуля максимальної швидкості в цій зоні істотно більше для циліндричного палика і

перевищує відповідну величину для плоского пальникового пристрою в 1,64 рази (див. 3.2).

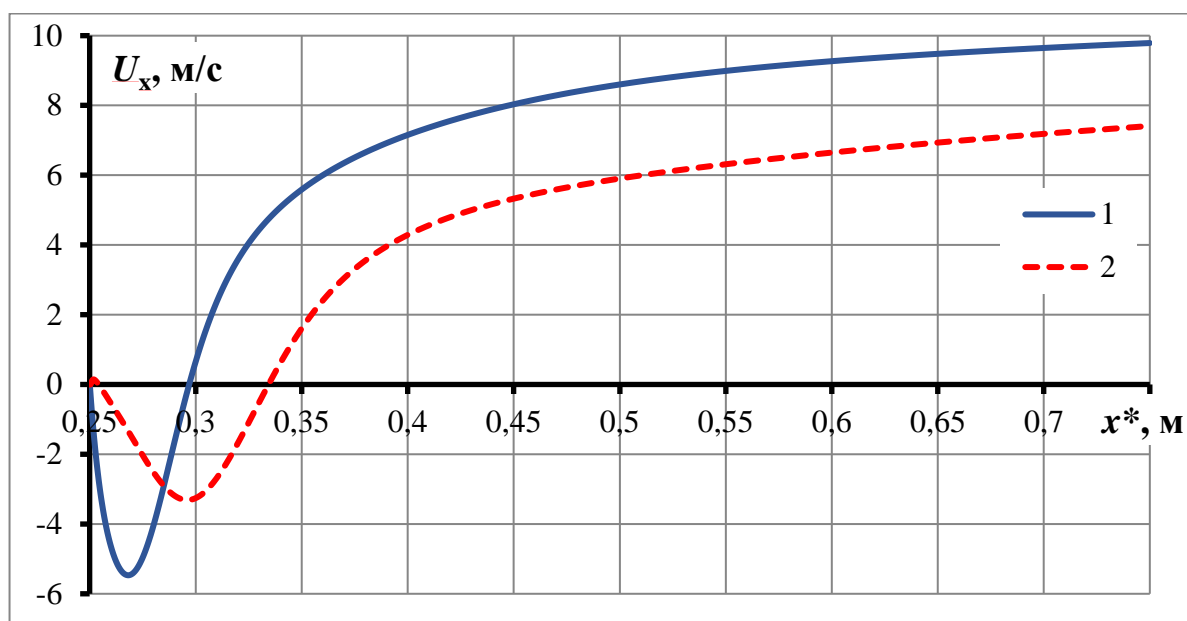


Рис. 3.2. Розподіл осьової компоненти швидкості вздовж осі сліду за циліндричним (1) і плоским (2) стабілізаторами полум'я.

Відповідно до отриманих даних, в ситуації застосування стабілізаторів полум'я циліндричної форми реалізуються більш низькі значення втрат тиску на пальниковому пристрої, ніж для плоских стабілізаторів. Для умов, що порівнюються, ці втрати становлять 72 Па і 81 Па відповідно.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що при використанні циліндричного стабілізатора полум'я мають місце значно вищі рівні пульсацій швидкості в ближньому сліді за стабілізатором в порівнянні з випадком плоского стабілізатора. Як видно з рис. 3.3, у випадку циліндричного стабілізатора полум'я розміри області з підвищеними значеннями пульсацій швидкості в ближньому сліді за стабілізатором помітно більші, ніж в ситуації плоского стабілізатора полум'я.

Як показали виконані дослідження, істотно відрізняються також і закономірності сумішоутворення палива й окиснювача в розглянутих

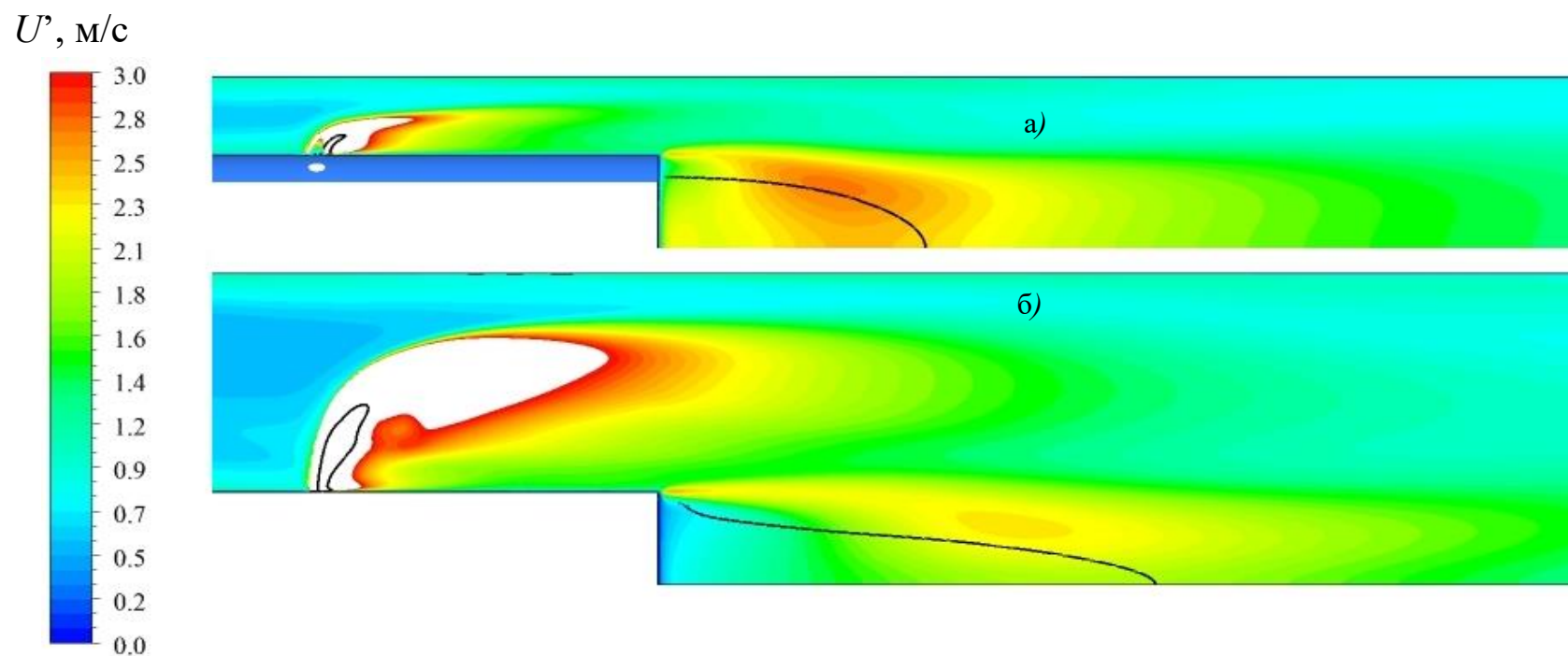


Рис. 3.3. Фрагменти поля середньої пульсаційної швидкості  $U'$  в поздовжньому перерізі пальникового пристрою з циліндричним (а) і плоским (б) стабілізаторами полум'я, що проходить через центр газоподавального отвору

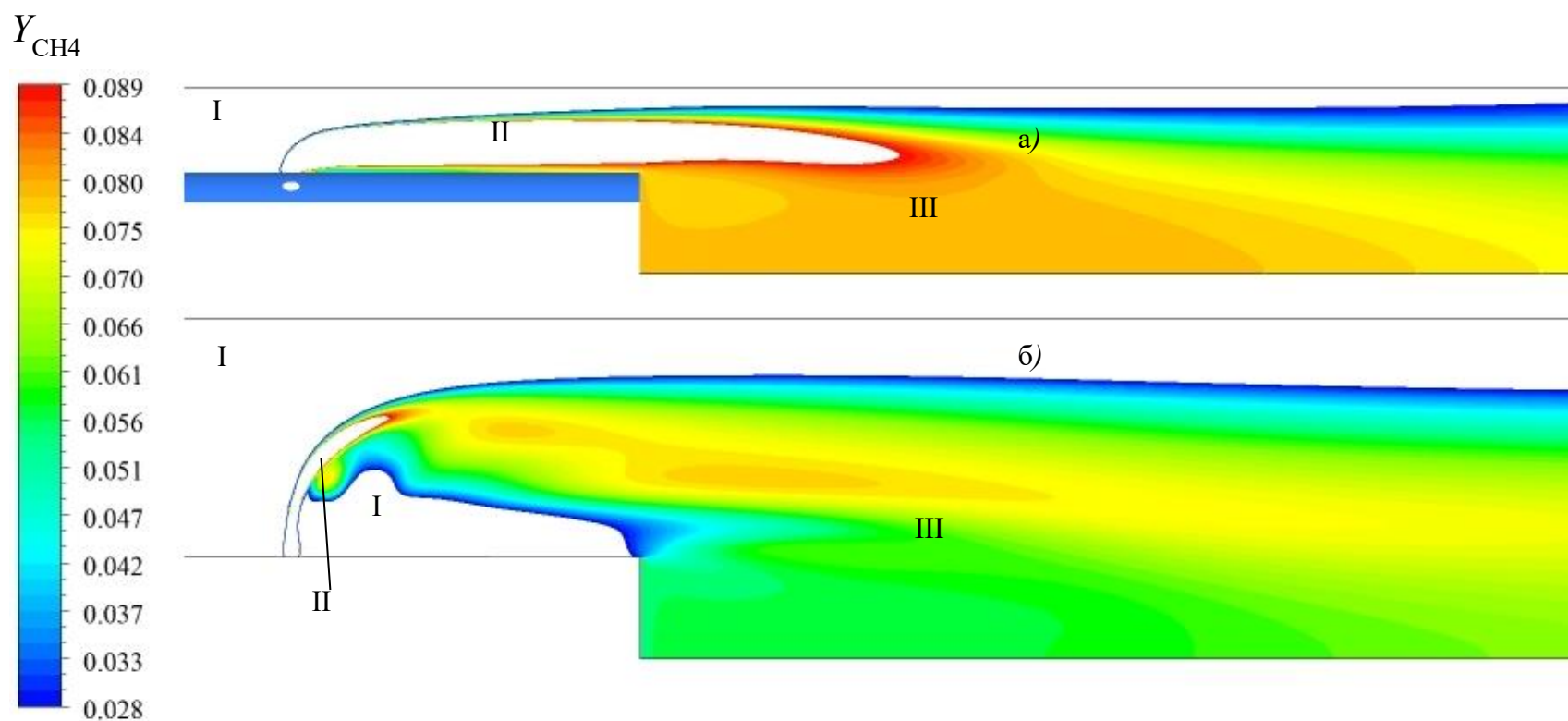


Рис. 3.4. Фрагменти поля масової концентрації метану  $Y_{CH_4}$  в поздовжньому перерізі пального пристрою з циліндричним (а) і плоским (б) стабілізаторами полум'я, що проходить через центр газоподавального отвору.

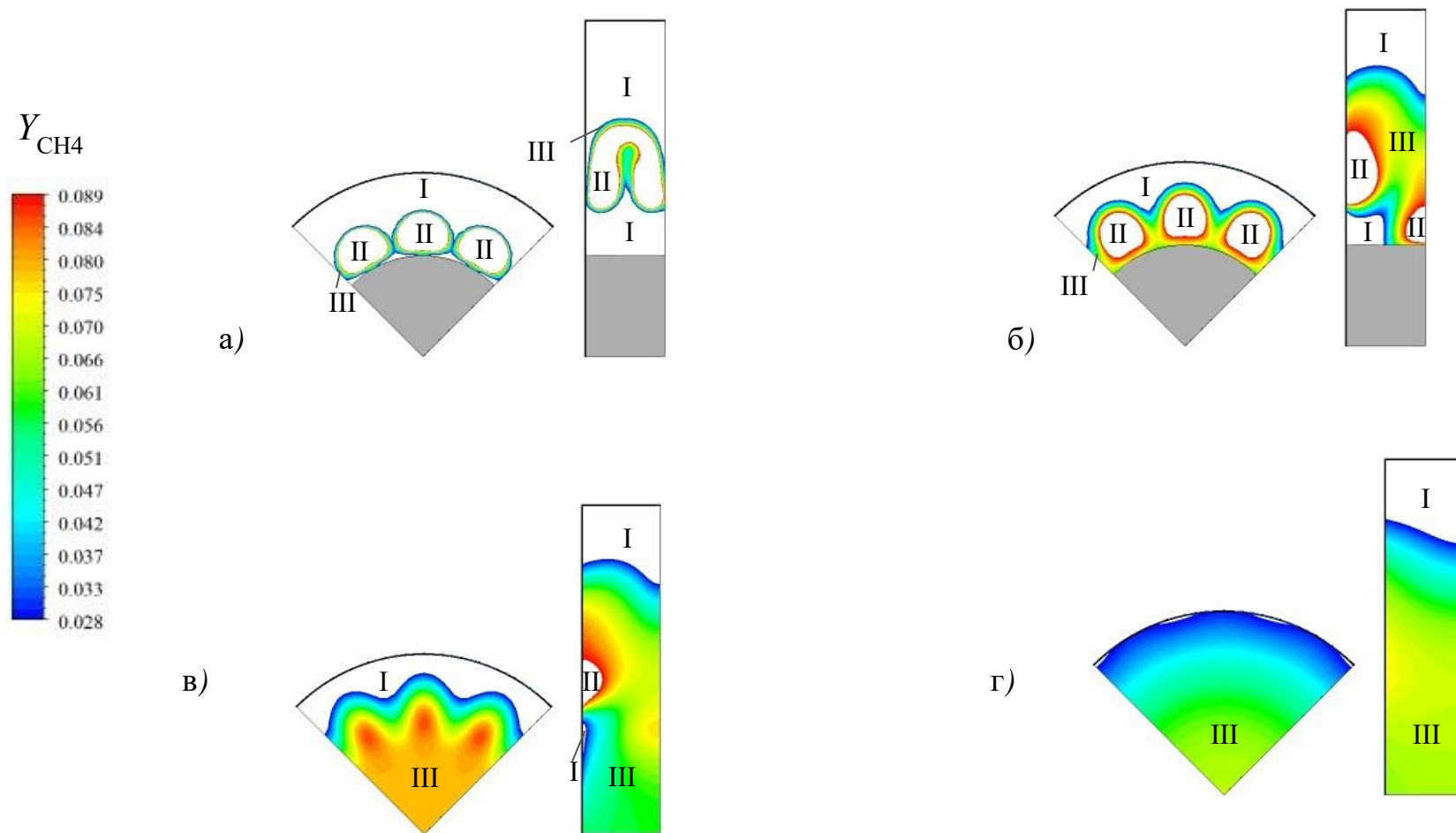


Рис. 3.5. Фрагменти поля масової концентрації метану  $Y_{CH_4}$  в поперечних перерізах пальникового пристрою, розташованих уверх по потоку від зривної кромки на відстані 50 мм (а), що відповідає зривній кромці стабілізатора (б), віддалених униз по потоку від зривної кромки на 50 мм (в) і 250 мм (г).



стабілізаторних пальникових пристроях (див. рис. 3.4, 3.5; тут зони I відповідають підвищеному вмісту повітря, де масова концентрація метану нижча за нижню концентраційну межу займання  $Y_{\text{CH}_4} < 0,028$ ; зони II характеризуються підвищеним вмістом палива, в них масова концентрація метану перевищує верхню концентраційну межу  $Y_{\text{CH}_4} > 0,089$ ; зони III відповідають значенням  $Y_{\text{CH}_4}$  в концентраційних межах займання).

Для ситуацій, що зіставляються, в цілому реалізується сприятлива картина змішування палива і окиснювача. Зокрема, в закормових областях стабілізаторів вміст метану відповідає концентраційним межам займання в обох розглянутих ситуаціях (див. рис. 3.4).

Для циліндричного стабілізатора полум'я на віддаленні 250 мм від зривної кромки вже практично весь переріз пальника зайнятий сумішшю, що відповідає концентраційним межам займання, тоді як в умовах плоского стабілізатора має місце зона з надмірним вмістом повітря (рис. 3.5, з). Таким чином, у разі застосування пальникових пристроїв з циліндричним стабілізатором полум'я забезпечується істотно більш рівномірний розподіл палива в потоці окиснювача.

На рис. 3.6, 3.7 представлено розрахункове поле температур в початкових перерізах циліндричного і плоского стабілізаторів полум'я. Рис. 3.8 ілюструє відносну нерівномірність поля температур для даних стабілізаторів. Як видно на рис. 3.8, у разі циліндричного пальникового пристрою нерівномірність поля температур в поперечних перерізах факела є менш значною, ніж для пальникових пристроїв з плоским стабілізатором полум'я, по всій довжині факела. Так, значення коефіцієнта відносної нерівномірності поля температур  $\gamma$  знижується до величини 0,3 на відстані  $x$  від зривної кромки стабілізатора, рівній приблизно 6,0 і 12,5 його калібру для циліндричного і плоского стабілізаторів полум'я відповідно. На рис. 3.9, 3.10 наведено дані комп'ютерного моделювання, що характеризують процес вигорання палива.

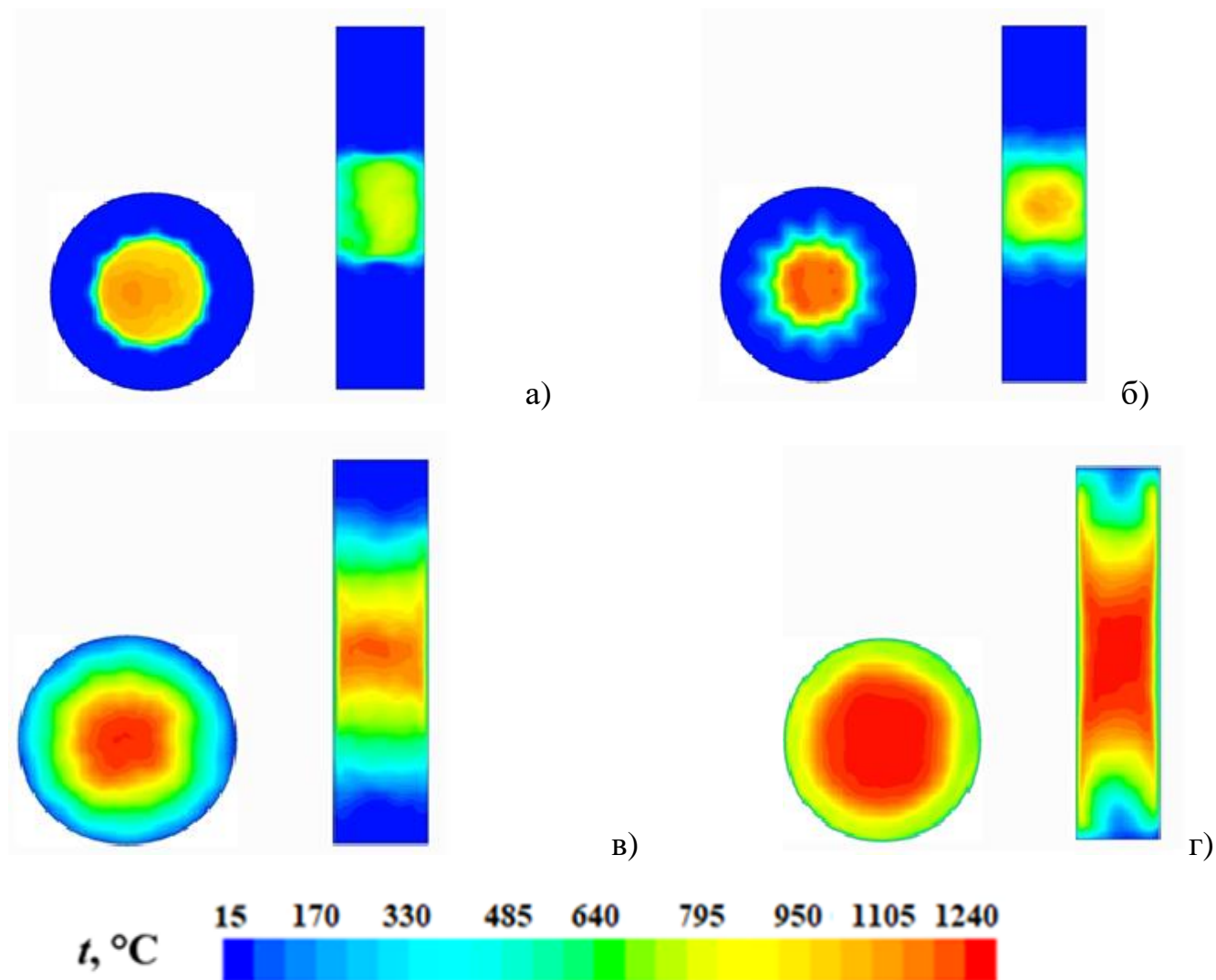


Рис. 3.6. Поля температур в поперечних перерізах палинкових пристроїв на різних відстанях  $x^*$  від зривної кромки стабілізатора:  $x^*=0,01$  м (а);  $x^*=0,03$  м (б);  $x^*=0,1$  м (в);  $x^*=0,25$  м (г).

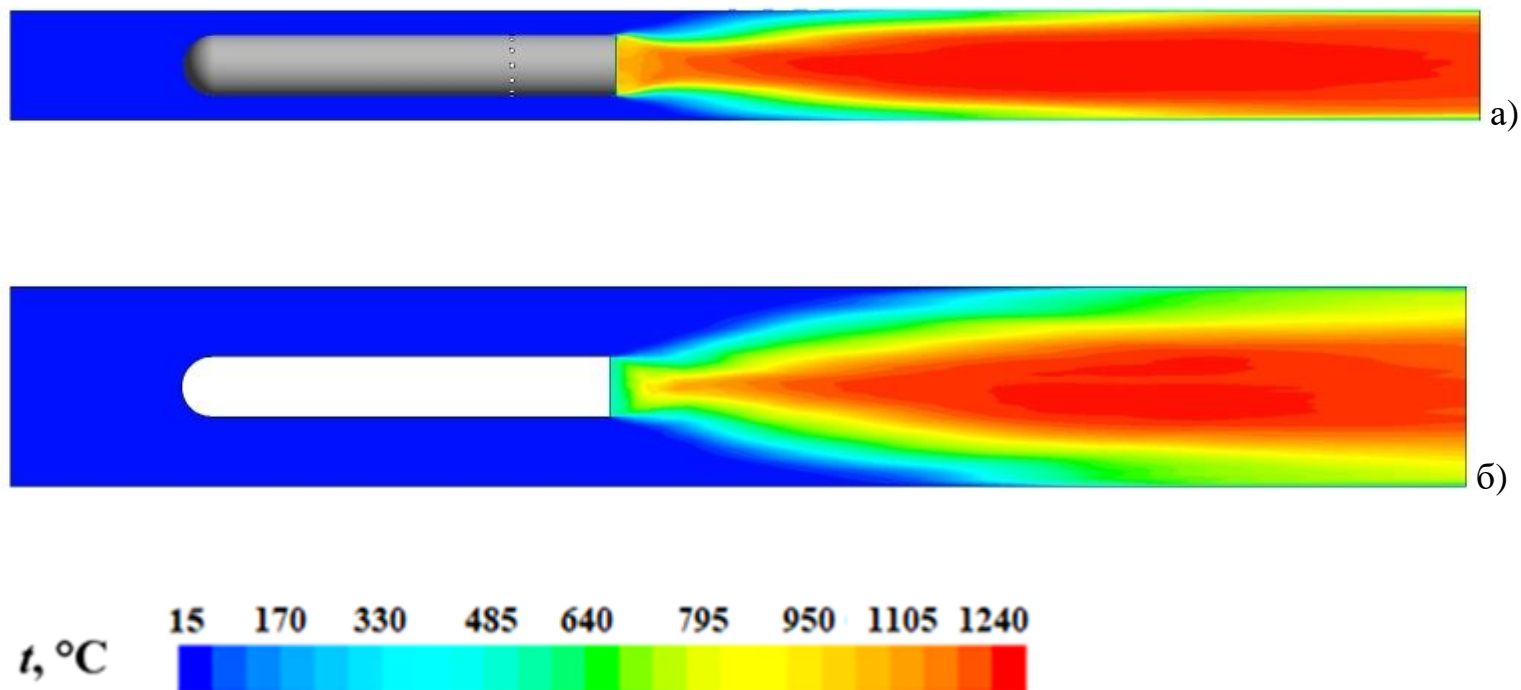


Рис. 3.7. Поля температур в поздовжніх перерізах, що проходять через вісь газоподавального отворів для пального пристрою з циліндричним (а) і плоским (б) стабілізатором.

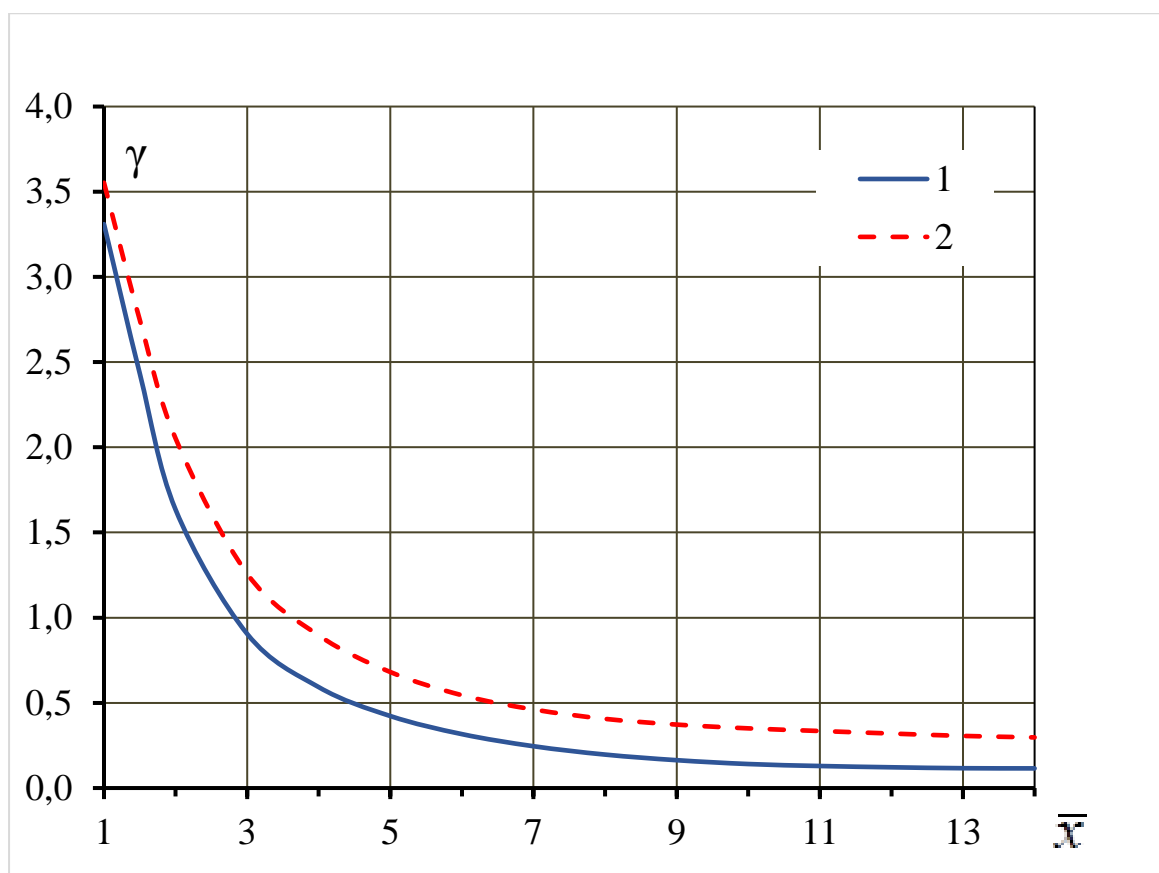


Рис. 3.8. Відносна нерівномірність поля температур в поперечних перерізах факела: 1-циліндричний стабілізатор; 2-плоский стабілізатор.

Щодо інтенсивності процесу вигорання, то, як свідчать отримані дані (рис. 3.10), вона істотно залежить від форми стабілізатора полум'я. У ближньому сліді за стабілізатором, поблизу зони рециркуляції, коефіцієнт повноти згорання палива для циліндричного і плоского стабілізаторів відрізняються несуттєво. Далі, з віддаленням від зривної кромки стабілізатора, розбіжність цих коефіцієнтів зростає. Процес вигорання палива відбувається помітно більш інтенсивно в разі циліндричного пальникового пристрою. Поблизу кінця зони горіння його інтенсивність обумовлюється, головним чином, турбулентною дифузією CO і  $H_2$  в умовах нестачі  $CH_4$  і  $O_2$ .

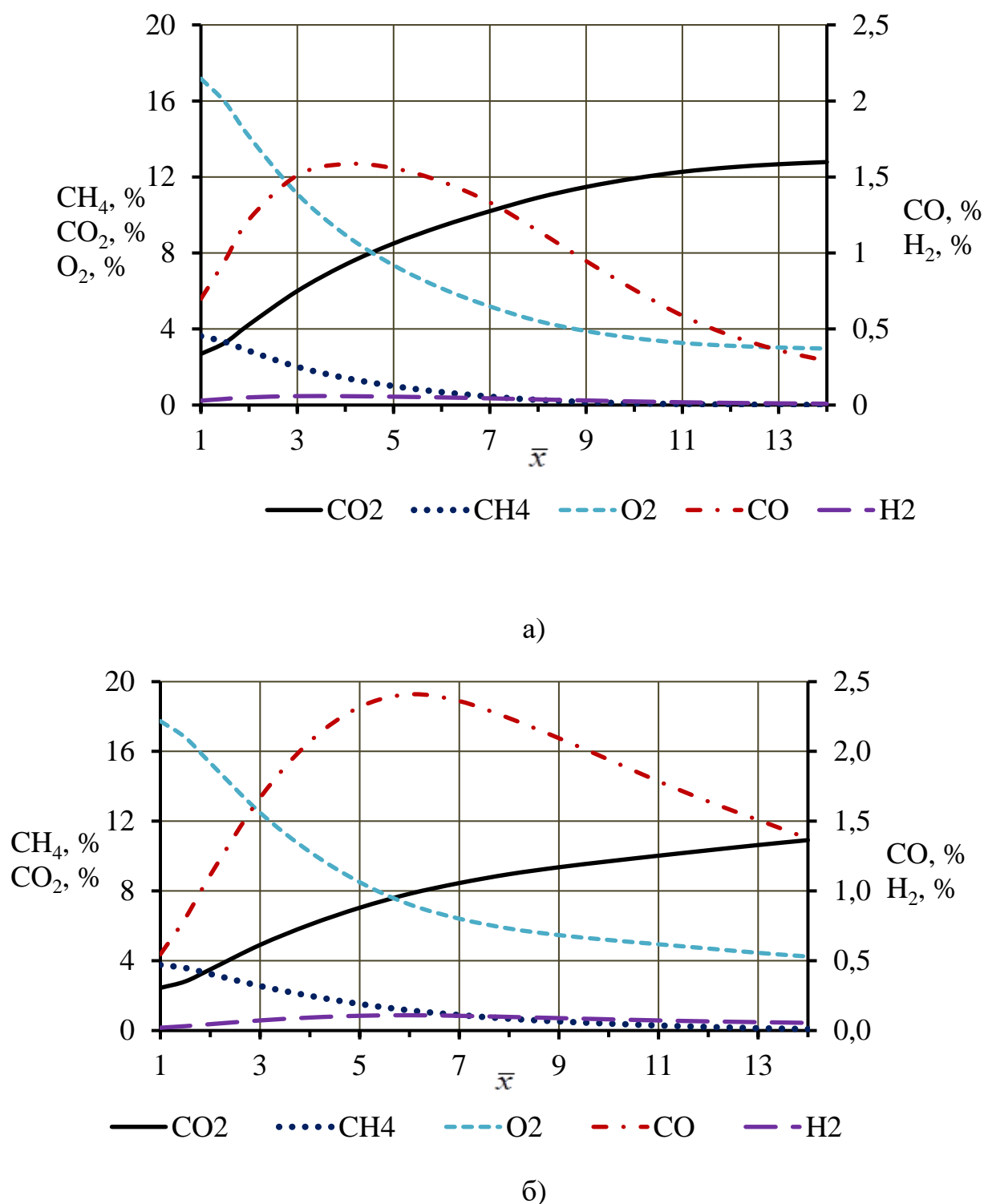


Рис. 3.9 Зміна масової концентрації компонентів реакції по довжині факела: циліндричний (а) і плоский (б) стабілізатор полум'я відповідно.

Рис. 3.11 ілюструє поле миттєвих значень температур у поздовжніх перерізах пальників за циліндричним (а) і плоским (б) стабілізаторами полум'я.

На основі отриманих даних, можна зробити висновок про те, що циліндричні пальникові пристрої в порівнянні з пальниковими пристроями з плоским

стабілізаторами полум'я характеризуються значно більшою турбулізацією потоку в закормовій області стабілізатора і істотно більш високою інтенсивністю протікання процесів сумішоутворення і вигорання палива.

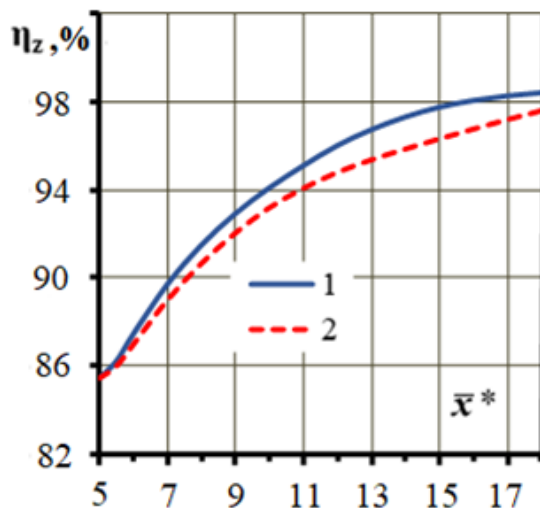


Рис. 3.10 Зміна коефіцієнта повноти згоряння палива по довжині факела.

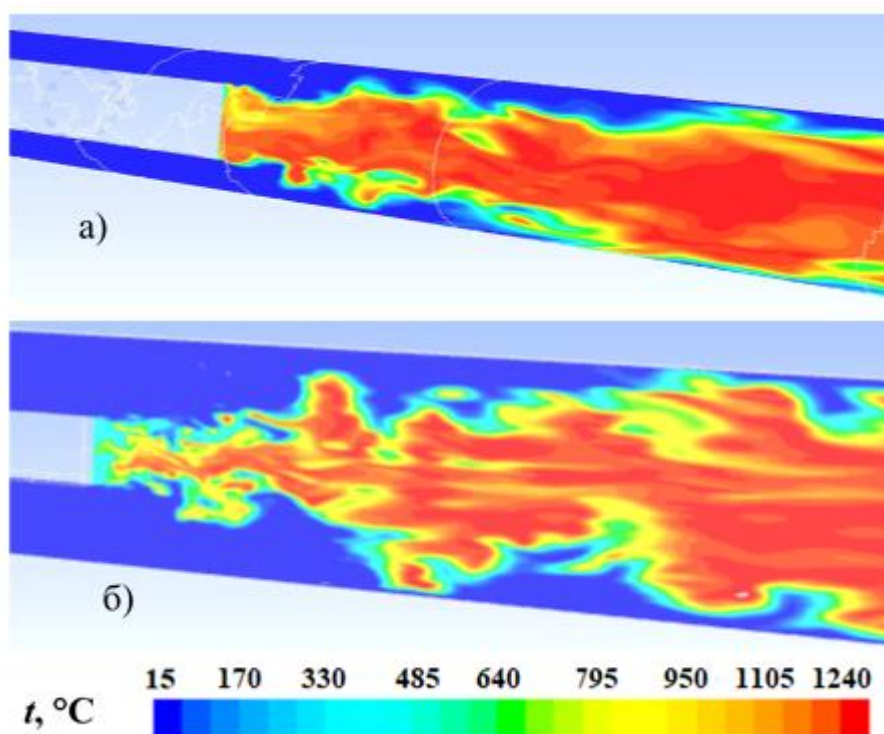


Рис. 3.11 Поле миттєвих значень температури у поздовжніх перерізах пальників з циліндричним (а) та плоским (б) стабілізаторами полум'я.

### 3.2. Конструктивні параметри типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами потужністю 30 - 200 кВт

Для типоряду гладких циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв потужністю 30-200 кВт виконано комплекс багатоваріантних параметричних досліджень робочих процесів цих пристроїв. На основі отриманих даних визначено раціональні конструктивні та режимні параметри пальників розглянутого типоряду. В табл. 3.1 і 3.2 наведено основні з цих параметрів.

Як слідує з наведених в табл. 3.1 даних, спостерігається досить чітко виражена кореляція між потужністю пальникового пристрою і геометричними характеристиками відповідних конструкцій. А саме, з ростом потужності пальника збільшуються діаметри циліндричного стабілізатора, газоподавальних отворів і зменшується відносний крок їх розташування.

*Таблиця 3.1.*

Основні конструктивні параметри типоряду циліндричних пальникових пристроїв потужністю від 30 до 200 кВт

$N_{п}$ , кВт	$d_{ст}$ , м	$D$ , м	$d$ , м	$N$	$S/d$
30	0,02	0,0365	0,002	9	3,5
110	0,04	0,073	0,003	13	3,22
155	0,05	0,091	0,0035	14	3,2
200	0,06	0,1095	0,004	15	3,14

*Таблиця 3.2.*

Основні режимні параметри типоряду циліндричних пальникових пристроїв потужністю від 30 до 200 кВт у номінальному режимі при  $\alpha = 1,1$

$N_{п}$ , кВт	$G_{г}$ , м <sup>3</sup> /час	$U_{г}^{BX}$ , м <sup>3</sup> /час	$U_{г}$ , м/с	$U_{п}^{BX}$ , м/с
30	2	32,3	29,49	12,28
110	11	118,6	33,27	11,25
155	15,5	167,1	31,98	10,23
200	20	215,6	29,49	9,09

Щодо інших геометричних характеристик розглянутих пальникових пристроїв, то вони задавалися наступним чином (рис. 3.12). Довжина стабілізатора  $L_{ст}$  і відстань  $L_1$  між зривною кромкою стабілізатора та газоподавальними отворами залишалися незмінними для всього типоряду. Передня кромка стабілізатора заокруглювалася радіусом, рівним радіусу циліндричного стабілізатора.

Зауважимо також, що наведені в табл. 3.1 значення діаметрів  $D$  круглого каналу, в якому розташовується циліндричний стабілізатор, обиралися з умови рівності величині 0,3 коефіцієнта загромождження прохідного перерізу каналу  $k_f$ .

### 3.3 Структура течії палива й окиснювача у пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я

Нижче на рис. 3.13 – 3.15 і в табл. 3.3 наводяться результати чисельного моделювання процесів течії для розглянутого типоряду пальників, які відповідають обраним конструктивним і режимним параметрам. Представлені результати відповідають наступним однаковим для всіх пальникових пристроїв вихідним даним: довжина стабілізатора  $L_{ст} = 0,25$  м; відстань між зривною кромкою і газоподавальними отворами  $L_1 = 0,06$  м; інтенсивність турбулентності повітря  $I_{п}$  на вході в канал і природного газу  $I_{г}$  в поперечному перерізі газоподавального отвору складає 3 %; абсолютна температура 300 К газу і повітря.



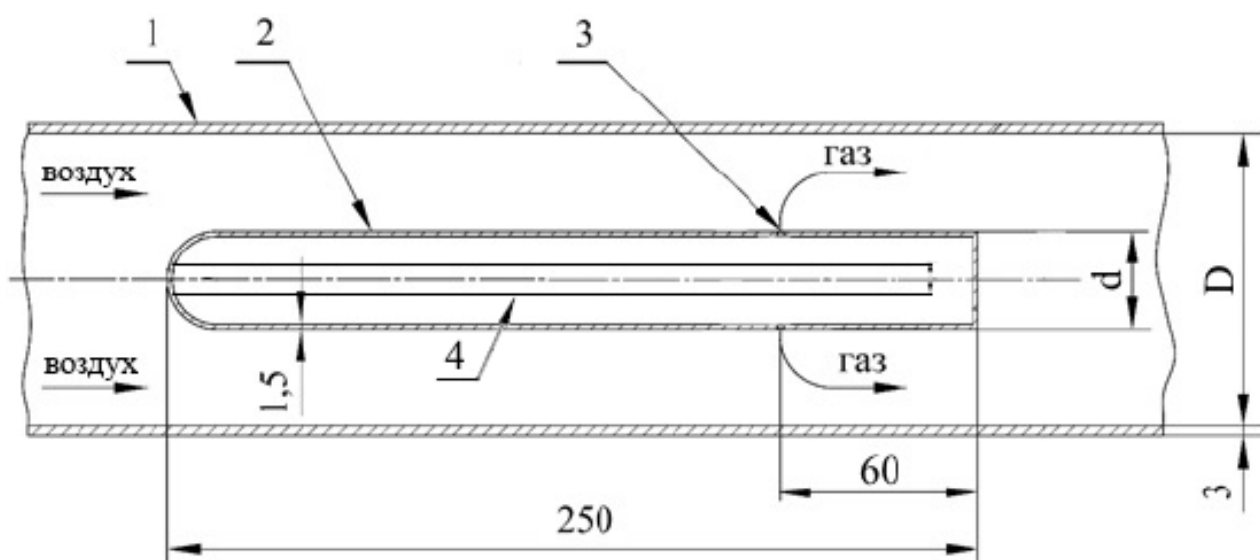


Рис. 3.12. Поперечний переріз гладкого циліндричного пальникового пристрою: 1 – канал; 2 - стабілізатор полум'я; 3 - газоподавальні отвори; 4 - канал для подачі газу.

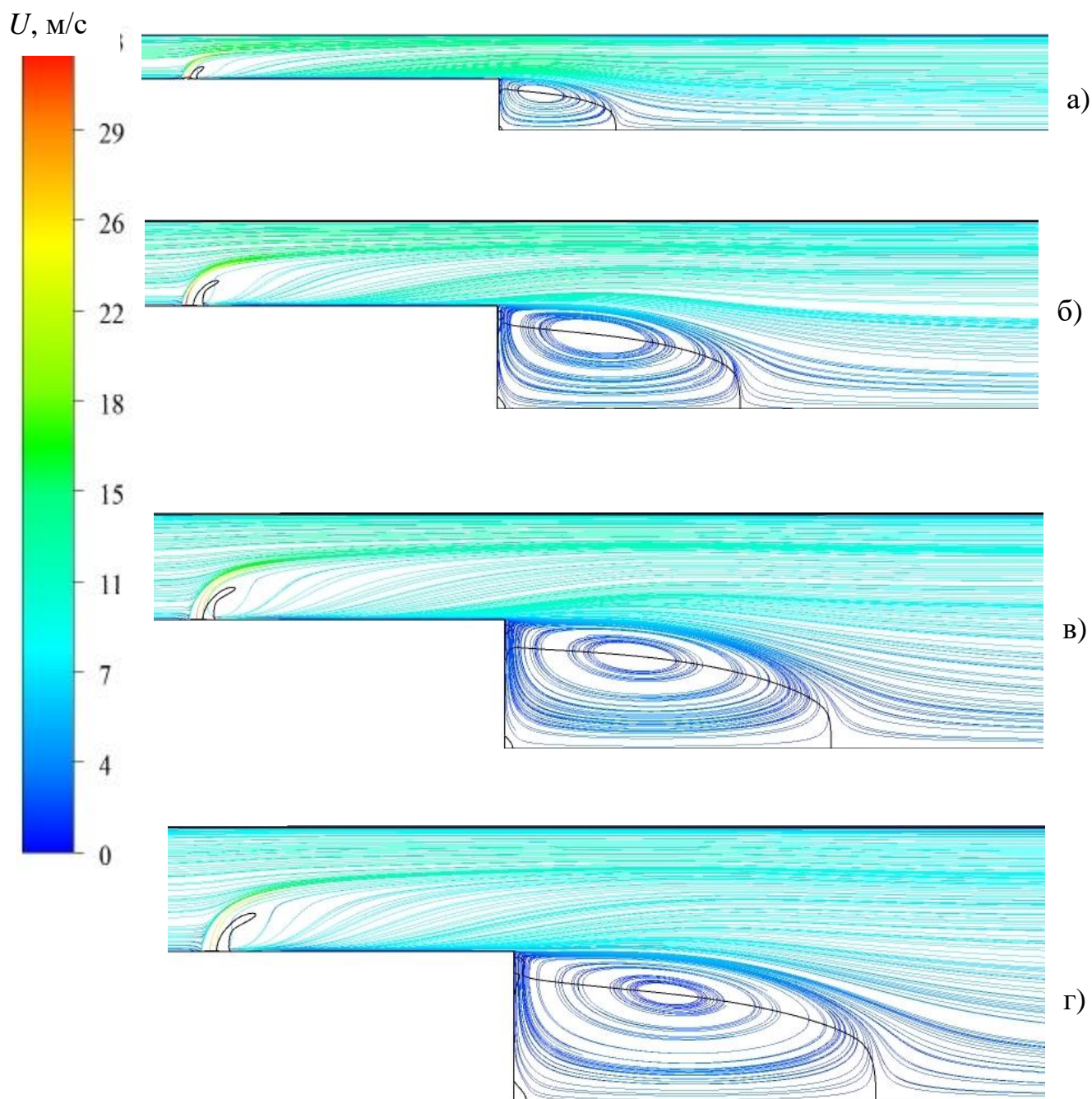


Рис. 3.13. Лінії току в поздовжньому перерізі пального пристрою  $\varphi=0$ , що проходить через вісь газоподавального отвору, за відсутності засобів інтенсифікації горіння для пальників різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Таблиця 3.3

Характеристики зон зворотних токів в закормовій області циліндричних стабілізаторів для паликових пристроїв різної потужності

$N_{\text{п}}, \text{кВт}$	$d_{\text{ст}}, \text{м}$	$L_{\text{зт}}, \text{м}$	$\overline{L}_{\text{зт}}, \text{м}$	$U_{\text{max}}, \text{м/с}$
30	0,02	0,0225	1,12	4,59
110	0,04	0,0475	1,19	3,98
155	0,05	0,0614	1,23	3,98
200	0,06	0,0722	1,2	3,16

Результати проведених досліджень свідчать про те, що основні закономірності течії палива й окиснювача зберігаються при різних значеннях потужності паликового пристрою. На рис. 3.13 представлено лінії току для палиників різної потужності в перерізі  $\varphi = 0$ , що проходить через центр газоподавального отвору. Як видно, в розглянутих умовах спостерігається проникнення струменів газу в зносячий потік окиснювача, утворення зон зворотних токів в закормовій області стабілізатора і далі вниз за потоком вирівнювання епюр швидкості і формування стабілізованої течії в каналі.

Картини течії в паликових пристроях різної потужності, які є якісно близькими, проте, значно відрізняються в кількісному відношенні. Так, в закормовій області стабілізатора характеристики зон зворотних токів виявляються істотно різними при різній потужності  $N_{\text{п}}$ . Як видно з рис. 3.14 і табл. 3.3, більшим значенням потужності паликового пристрою відповідають більші протяжності  $L_{\text{зт}}$  зон зворотних токів. При потужності  $N_{\text{п}}$ , що дорівнює 30, 110, 155 і 200 кВт зазначені протяжності становлять 0,0225, 0,0475, 0,0614, 0,0722 м відповідно. Що ж до відносних величин  $\overline{L}_{\text{зт}}$  ( $\overline{L}_{\text{зт}} = L_{\text{зт}}/d_{\text{ст}}$ ), то вони відрізняються між собою досить незначно. Максимальні величини  $U_{\text{max}}$  абсолютних значень швидкості в зонах зворотних токів дещо підвищуються зі зниженням потужності  $N_{\text{п}}$  (див. табл. 3.3).

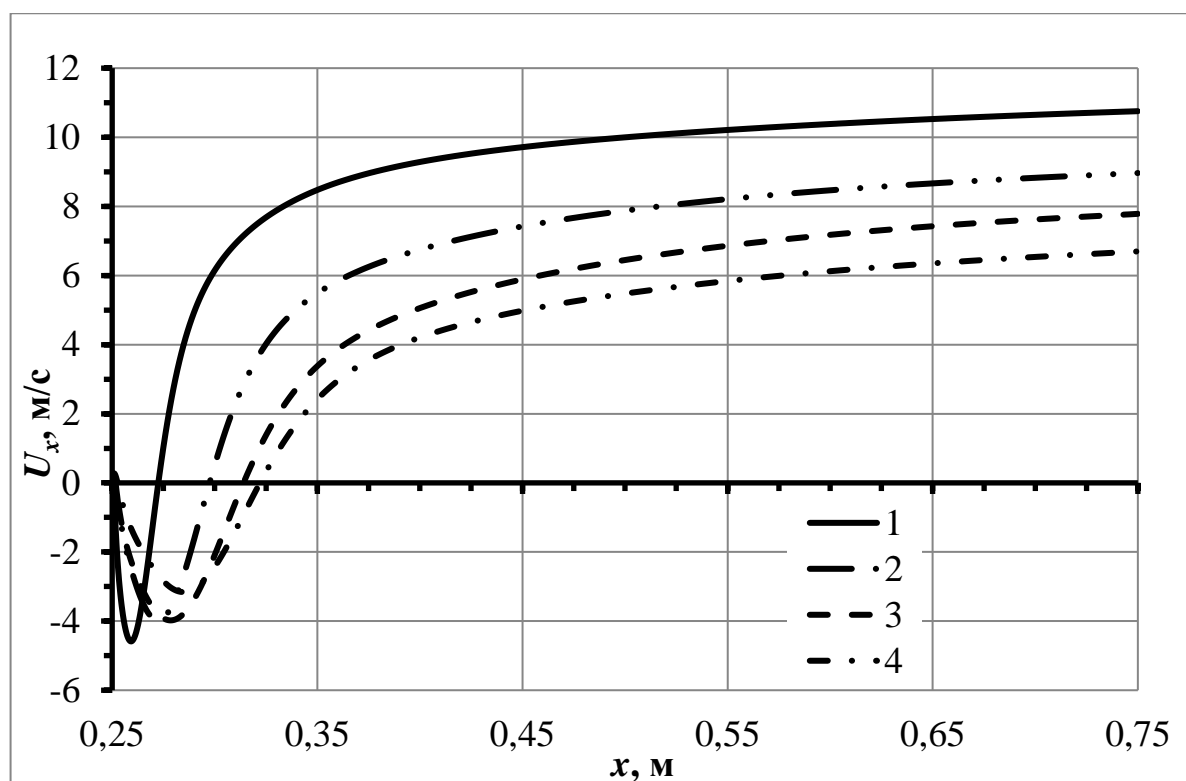


Рис. 3.14. Розподіл осьової компоненти швидкості  $U_x$  уздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за відсутності засобів інтенсифікації горіння для пальників різної потужності: 1 –  $N_{\text{п}} = 30$  кВт; 2 –  $N_{\text{п}} = 110$  кВт; 3 –  $N_{\text{п}} = 155$  кВт; 4 –  $N_{\text{п}} = 200$  кВт.

Істотно різними для пальників різної потужності виявляються і глибини  $h$  проникнення струменів газу в потік повітря. Останні зі збільшенням  $N_{\text{п}}$  значно зростають. Так, для пальникових пристроїв потужністю 30 і 200 кВт величини  $h$  складають 0,007 і 0,019 м відповідно. При цьому відносні значення  $\bar{h}$  ( $\bar{h} = 2h/(D - d)$ ) навпаки дещо зменшуються з ростом потужності  $N_{\text{п}}$ . Для пальників зазначеної потужності ці відносні значення дорівнюють 0,85 і 0,77.

Для розглянутих пальникових пристроїв різної потужності спостерігаються також і суттєві відмінності в характеристиках турбулентної течії. На рис. 3.15 до прикладу представлено розподіл інтенсивності турбулентності вздовж осі сліду за циліндричним стабілізатором для пальників досліджуваного типоряду. Як видно, максимальні рівні інтенсивності турбулентності в зоні зворотних токів відповідають пальниковому пристрою найменшої потужності.

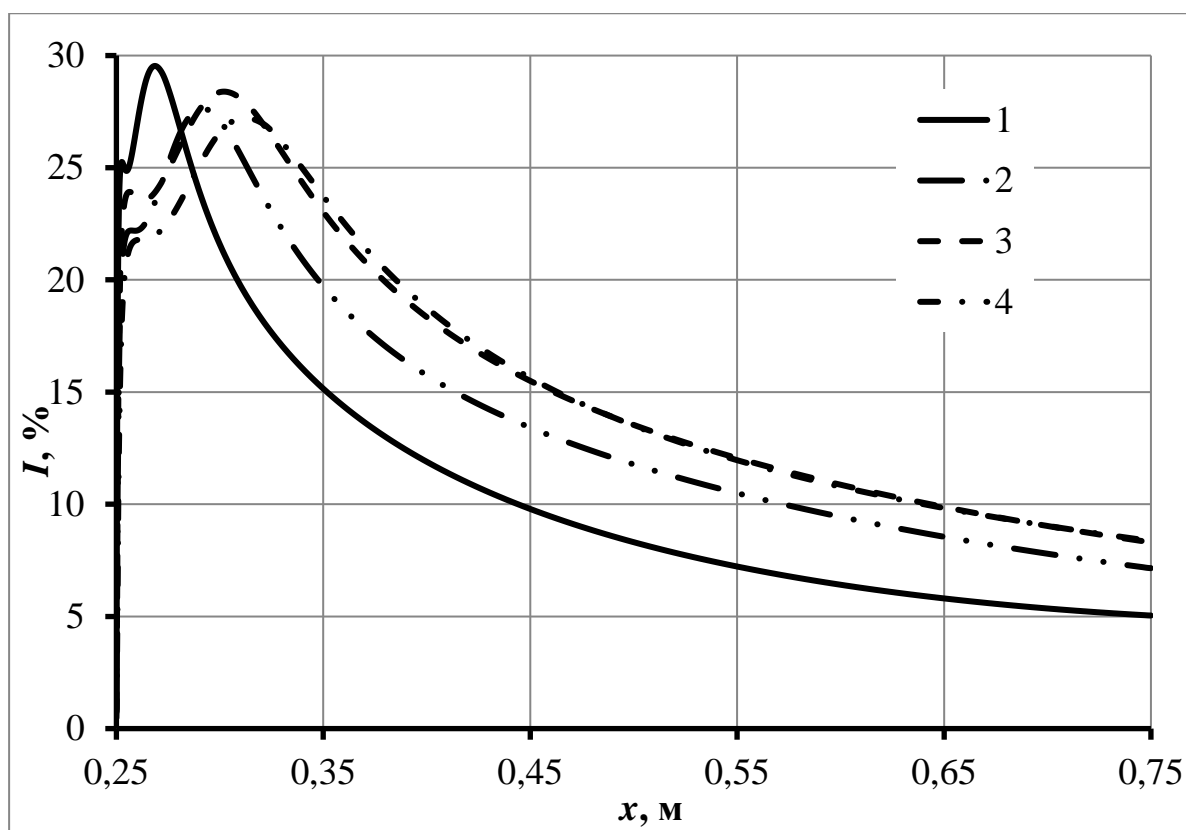


Рис. 3.15. Розподіл інтенсивності турбулентності вздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за відсутності засобів інтенсифікації горіння для пальників різної потужності: 1 –  $N_{\text{п}} = 30$  кВт; 2 –  $N_{\text{п}} = 110$  кВт; 3 –  $N_{\text{п}} = 155$  кВт; 4 –  $N_{\text{п}} = 200$  кВт.

#### 3.4. Особливості сумішоутворення палива й окиснювача в пальниках досліджуваного типу

Згідно з отриманими даними, для циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності зберігаються також і загальні закономірності сумішоутворення палива й окиснювача. Рис. 3.16 - 3.18 ілюструють характер полів масових концентрацій метану для типоряду пальникових пристроїв, який розглядається. Тут зони I і II відповідають областям з надлишковим вмістом повітря і природного газу відповідно, а зони III - областям, в яких суміш знаходиться в концентраційних межах займання. Як видно, в цілому, спостерігається сприятлива картина сумішоутворення палива і окиснювача в пальникових пристроях. У зонах

зворотних токів за стабілізатором суміш відповідає концентраційним межам займання, що є, як відомо, одним з найважливіших умов стабілізації полум'я. Важливо також відзначити, що для паликових пристроїв, що досліджуються середні концентрації метану в зонах зворотних токів відрізняються від відповідної стехіометричної концентрації порівняно незначно (відхилення не перевищують 1,7 %).

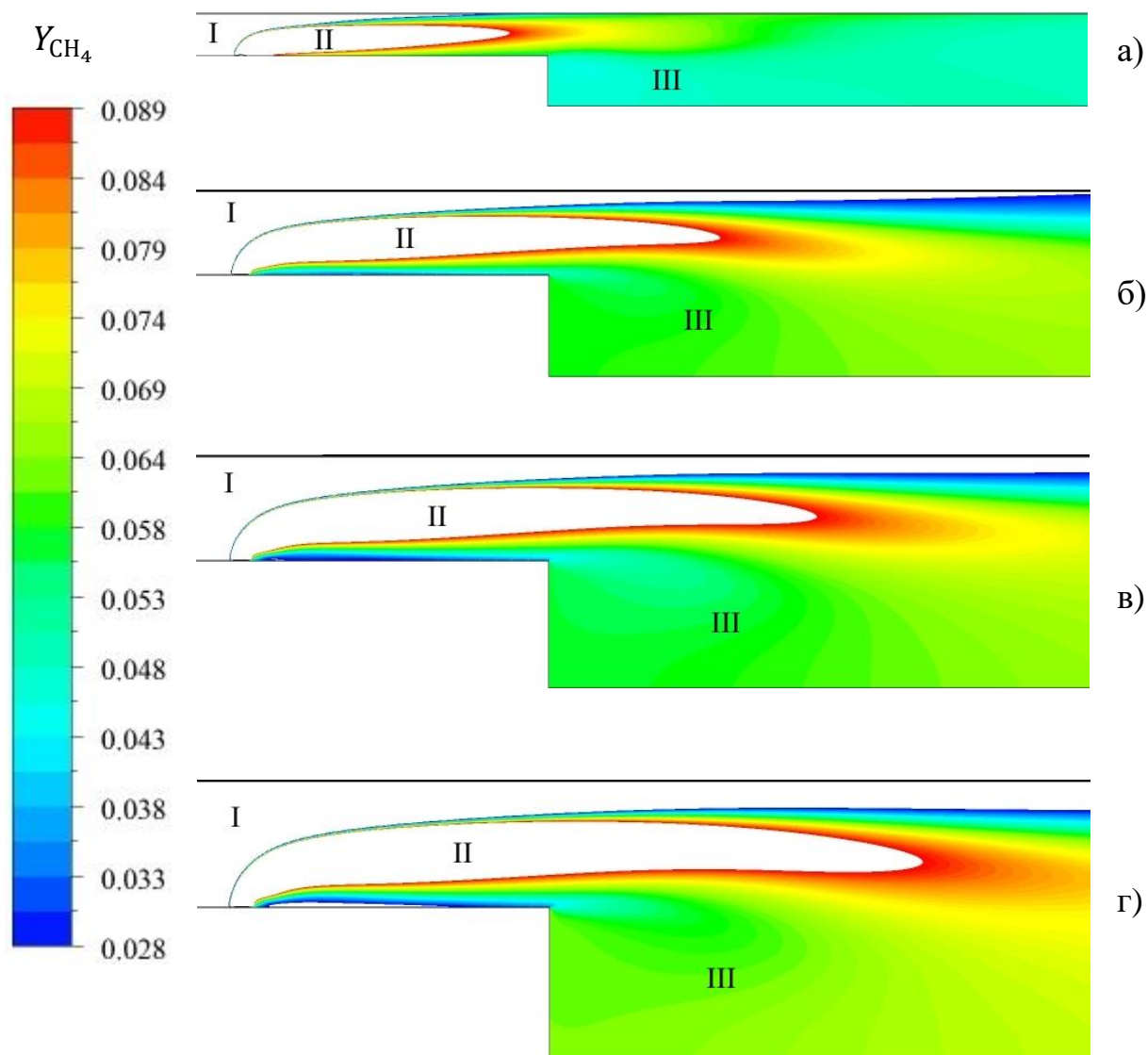


Рис. 3.16. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі циліндричного паликового пристрою  $\varphi = 0$ , що проходить через вісь газоподавального отвору, за відсутності засобів інтенсифікації горіння для паликів різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт(в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

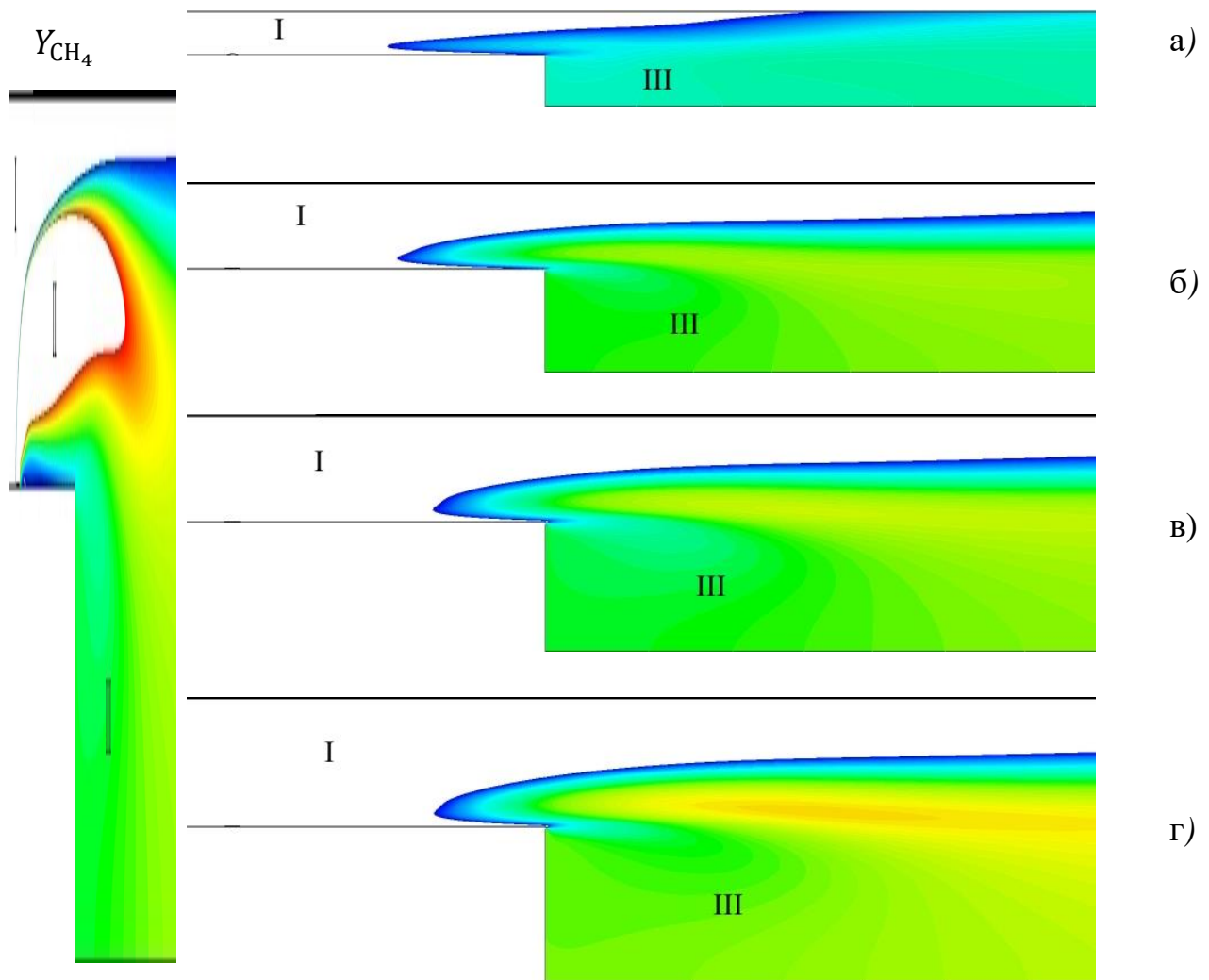


Рис. 3.17. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі циліндричного пальникового пристрою, що проходить посередині між газоподавальними отворами, за відсутності засобів інтенсифікації горіння для пальників різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт(в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Як свідчать результати математичного моделювання, при якісно подібному характері процесу сумішоутворення в пальниках розглянутого типоряду, проте, поряд з цим спостерігаються також і певні особливості даного процесу для пальників різної потужності. Наприклад, в пальниковому пристрої потужністю 30 кВт реалізується високий ступінь змішування газового струменя з повітрям так що значна частина поперечного перерізу, що проходить через задню кромку стабілізатора, виявляється зайнятої сумішшю, що відповідає концентраційним

межам займання. З ростом потужності пальника картина дещо змінюється, інтенсивність сумішоутворення знижується і суміш знаходиться в концентраційних межах у все меншій частині зазначеного перерізу.

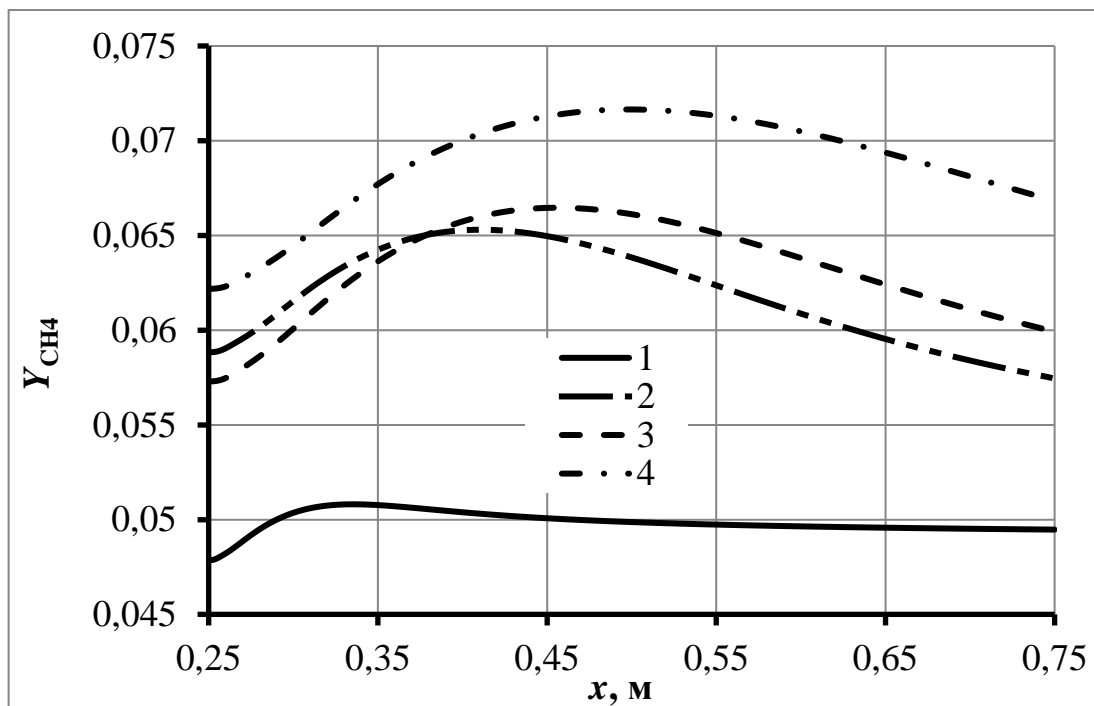


Рис. 3.18. Розподіл масової концентрації метану вздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за відсутності засобів інтенсифікації горіння для пальників різної потужності: 1 –  $N_{\text{п}} = 30$  кВт; 2 –  $N_{\text{п}} = 110$  кВт; 3 –  $N_{\text{п}} = 155$  кВт; 4 –  $N_{\text{п}} = 200$  кВт

Так, в пальниковому пристрої потужністю  $N_{\text{п}} = 200$  кВт суміш відповідає зазначеним межам лише в порівняно невеликій частині даного перерізу, прилеглої до стабілізатора. При цьому зростають розміри підобласті з надмірним вмістом повітря, що знаходиться на периферії кільцевого каналу. З підвищенням потужності циліндричного пальника істотно збільшуються також розміри зон з надмірним вмістом природного газу, які охоплюють власне газові струмені. Причому ці зони з ростом  $N_{\text{п}}$  все більше поширюються за межі зривної кромки стабілізатора.

Характеризуючи в цілому процеси сумішоутворення в циліндричних



стабілізаторних пальникових пристроях розглянутого типоряду, необхідно відзначити таке. У пальниках малої потужності ( $N_{\text{п}}=30$  кВт) реалізується практично повне попереднє сумішоутворення, тобто змішування палива й окиснювача закінчується біля зривної кромки стабілізатора. Це, як відомо, відповідає режиму горіння близькому до кінетичного і відповідно короткому факелу полум'я. З ростом потужності пальника все більша частина процесу сумішоутворення виноситься за межі зривної кромки стабілізатора в топковий простір. При цьому підвищується ступінь дифузійності горіння, і збільшується довжина факела полум'я.

3.5. Вплив відстані між зривною кромкою і газоподавальними отворами на характеристики процесів переносу в пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я

Знання закономірностей змішування природного газу й повітря в пальниковому пристрої дозволяє регулювати процес сумішоутворення і, відповідно, створювати факел полум'я різної довжини. При цьому для вогнетехнічних об'єктів, які вимагають короткого факела полум'я, необхідно прискорювати сумішоутворення в пальнику, забезпечуючи надходження до його устя горючої суміші високого ступеня перемішаності. А для об'єктів з довгим факелом полум'я навпаки потрібно уповільнення змішування струменів газу з повітрям так, щоб до устя пальника вони були перемішані лише незначно [140].

Зазначене регулювання процесу сумішоутворення і, відповідно, довжини факела полум'я може реалізуватися за допомогою зміни відстані  $L_1$  від місця виходу газу з отворів до устя пальника. У вогнетехнічних об'єктах відносно малих розмірів газоподавальні отвори повинні бути глибоко втоплені в амбразурі пальника, тобто величину  $L_1$  слід вибирати порівняно великою. Щодо вогнетехнічних об'єктів значних розмірів, то тут струмені повинні розташовуватися поблизу устя пальника, тобто відстань  $L_1$  необхідно скорочувати.

Циліндричні пальникові пристрої, які досліджуються в даній роботі, відносяться до пристроїв відносно малої потужності і орієнтовані на використання, головним чином, у вогнетехнічних об'єктах порівняно невеликих розмірів.

Зважаючи на це, має інтерес розгляд першої із зазначених вище ситуацій, коли до устя пальника надходить суміш високого ступеня перемішаності газу й повітря, таким чином, що практично весь поперечний переріз пальника, який проходить через зривну кромку стабілізатора, зайнято сумішшю, що знаходиться в концентраційних межах займання.

Проведені дослідження показали, що розмір, при якому реалізується такий ступінь перемішаності в усті пальника, виявляється різним для пальників різної потужності (див.табл. 3.4 і рис. 3.19). Як видно з табл. 3.4, чим вище потужність пальникового пристрою, тим більшим є значення  $L_1^*$ . Так, при  $N_{\Pi} = 30$  кВт величина  $L_1^* = 0,07$  м, а при  $N_{\Pi} = 200$  кВт досягає 0,14 м.

Таблиця 3.4

Значення абсолютної й відносної відстані  $L_1^*$ , за якої в усті пальника газ і повітря практично повністю перемішані, для циліндричних пальників різної потужності

$N_{\Pi}$ , кВт	30	110	155	200
$L_1^*$ , м	0,07	0,105	0,1225	0,14
$d$ , м	0,002	0,003	0,0035	0,004
$L_1^*/d$	35	35	35	35

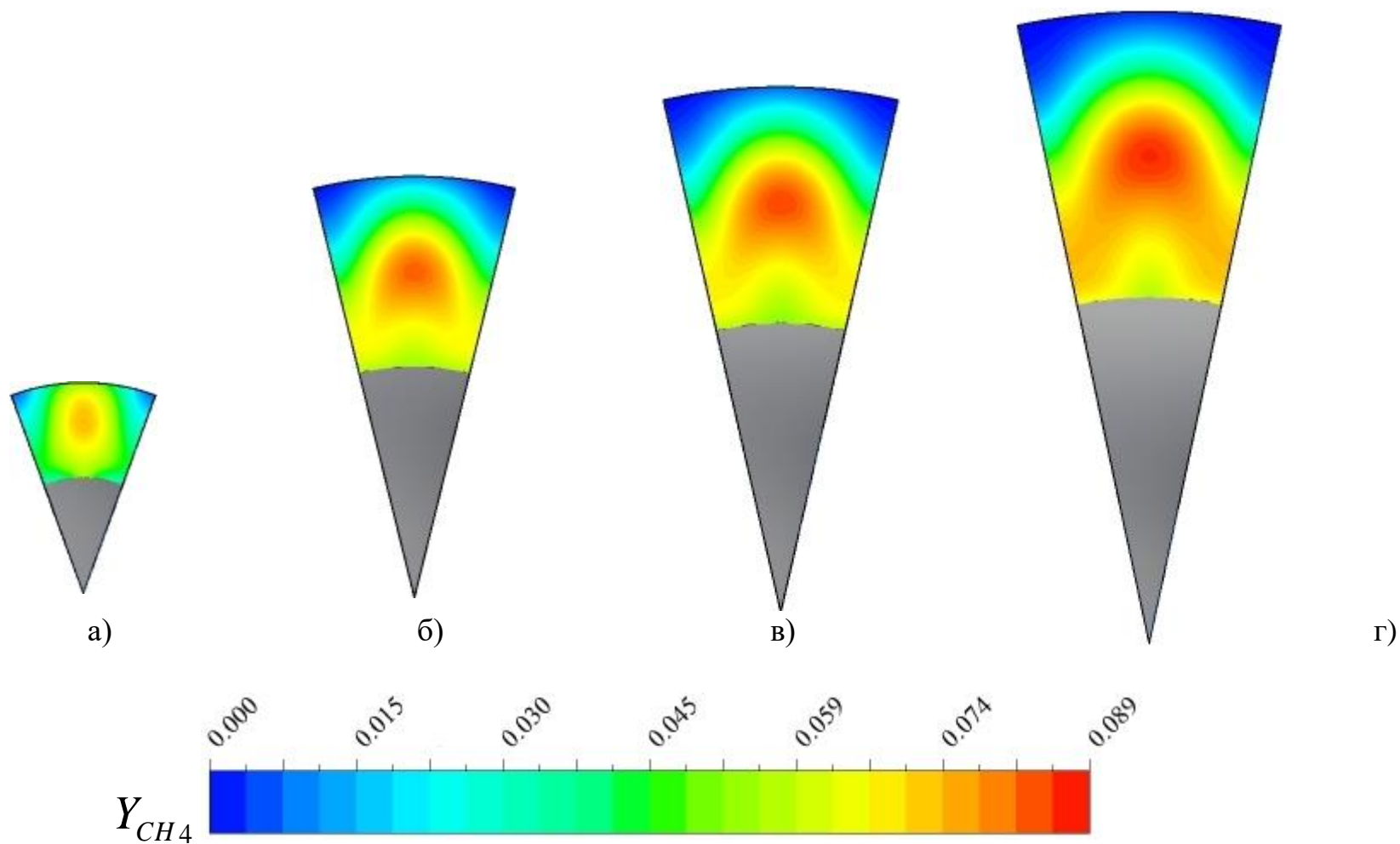


Рис. 3.19. Фрагмент поля масової концентрації метану в поперечному перерізі, що проходить через задню кромку стабілізатора, при  $L_1^*/d = 35$  для циліндричних пальникових пристроїв різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Дану обставину можна пояснити таким чином. Змішування газу з повітрям, як відомо, можна подовжити або прискорити не тільки за рахунок зміни відстані  $L_1$ , але також варіюючи діаметр  $d$  газоподавальних отворів. При цьому зі збільшенням даного діаметра сумішоутворення затягується і відповідно значення  $L_1^*$  зростає. В аналізованих умовах підвищення потужності  $N_{\text{п}}$  пальникового пристрою пов'язано зі збільшенням діаметра газоподавальних отворів, що й обумовлює зростання відстані  $L_1^*$ .

Таким чином, для даної ситуації підтверджується положення про те, що процес сумішоутворення в пальникових пристроях визначається величиною  $L_1/d$ , що являє собою відношення відстані між затупленою задньою кромкою стабілізатора і газоподавальними отворами до діаметру цих отворів.

В результаті виконаних чисельних досліджень встановлено, що відношення  $L_1^*/d$ , яке відповідає практично повній перемішаності палива й окиснювача в усті пальника, в разі циліндричних пальників різної потужності виявляється близьким за величиною і рівним приблизно 35. Тобто для того, щоб розглянуті пальникові пристрої були пристроями з так званим внутрішнім сумішоутворенням, необхідно розташовувати газоподавальні отвори на відстані від зривної кромки стабілізатора, рівній приблизно 35-ти діаметрам цих отворів.

### 3.6 Пускові та зривні характеристики пальників досліджуваного типу

Стабілізація полум'я в пальникових пристроях різного типу в більшості випадків забезпечується завдяки застосуванню різних аеродинамічних методів. У розглянутих пальникових пристроях стійкість роботи досягається за допомогою формування зон зворотних токів в закормових областях стабілізаторів, які покликані забезпечити безперервне займання палива.

У роботі виконано експериментальні дослідження стійкості горіння для гладких циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв. Характерні результати проведених експериментів представлено на рис. 3.20, 3.21.

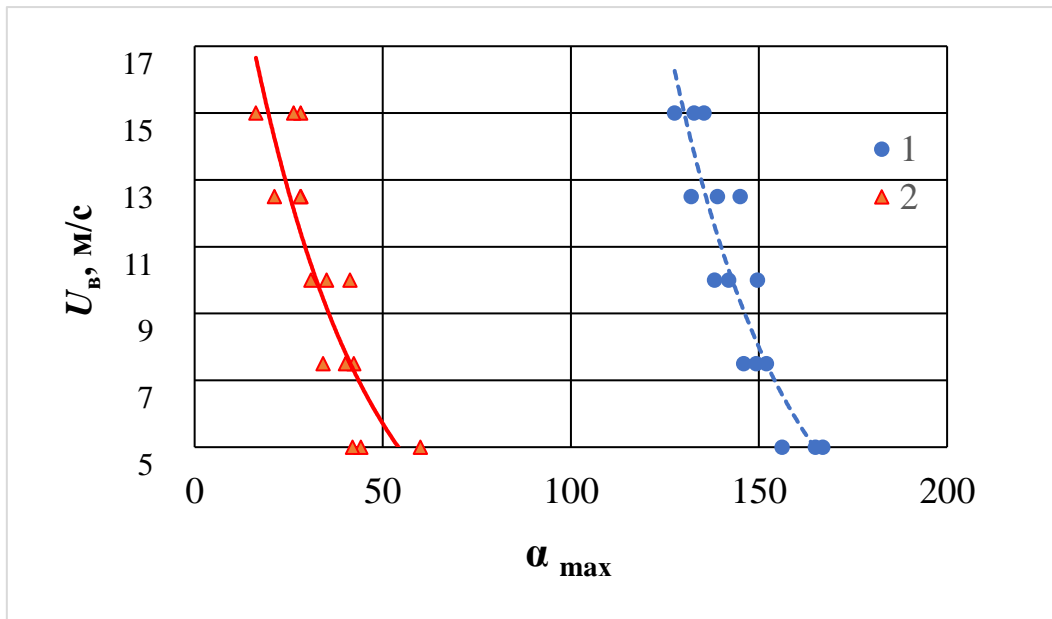


Рис. 3.20. Експериментальна залежність коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha_{max}$  на бідному зриві від швидкості повітря на вході в пальниковий пристрій: 1 –  $S/d=3,2$ ; 2 –  $S/d=6,5$ .

Рис. 3.20 ілюструє залежність коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{max}$  на бідному зриві полум'я від швидкості повітря на вході в пальниковий пристрій. Як видно, з ростом швидкості повітря величина  $\alpha_{max}$  спадає, тобто стабілізація полум'я на бідному зриві погіршується.

Щодо впливу величин  $S/d$  на значення  $\alpha_{max}$ , то більшим  $S/d$  відповідають менші значення  $\alpha_{max}$ . Іншими словами, стабілізація полум'я на бідному зриві покращується зі зменшенням відносної відстані між газоподавальними отворами. Це пов'язано з тим, що при збільшенні  $S/d$  глибина проникнення газових струменів в потік повітря зростає, і в зону зворотних токів за стабілізатором потрапляє менша кількість палива. Дана обставина і обумовлює погіршення зривних характеристик пальникового пристрою.

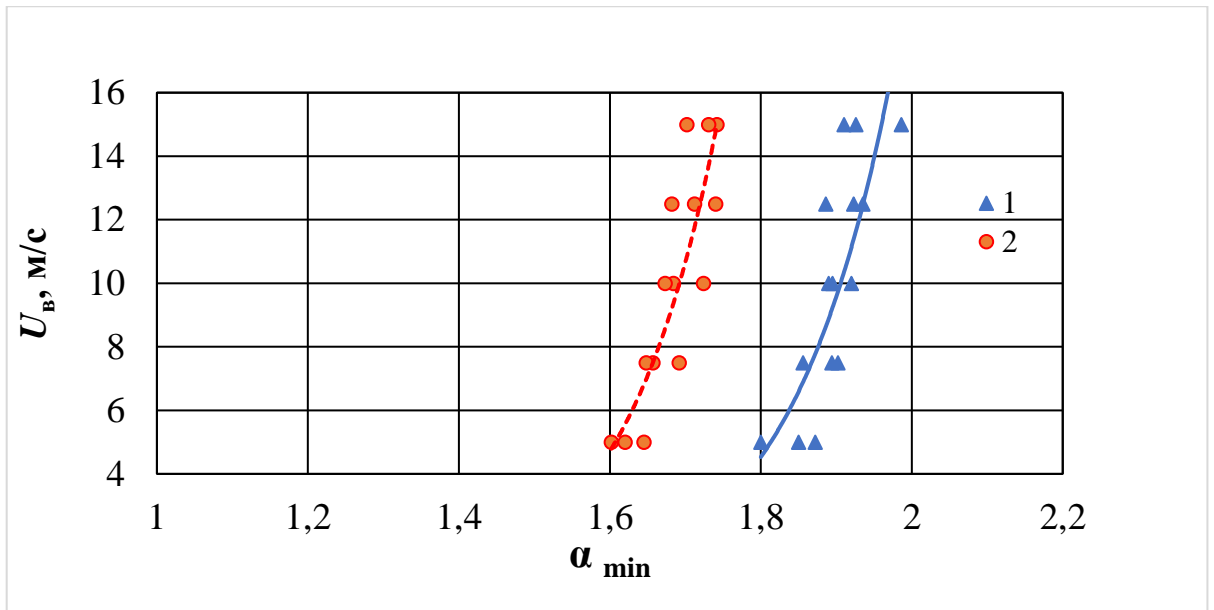


Рис. 3.21. Експериментальна залежність коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{\min}$  на багатому зриві від швидкості повітря на вході в пальниковий пристрій: 1 –  $L_1=0,015$  м; 2–  $L_1 = 0,03$  м.

На рис. 3.21 наведено експериментальну залежність коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{\min}$  при багатому зриві від швидкості повітря на вході в пальник. Згідно з отриманими даними, стійкість факела на багатому зриві погіршується ( $\alpha_{\min}$  збільшується) з ростом швидкості повітря та зі зменшенням  $L_1$  від зривної кромки стабілізатора полум'я до газоподавальних отворів.

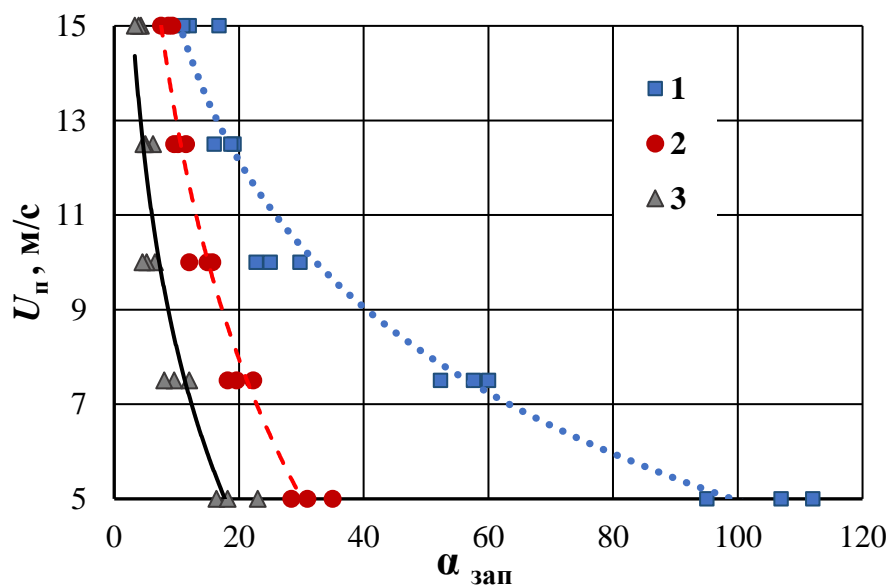


Рис. 3.22. Характеристики займання для пальника з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я при  $L_1^*=0,015$ м: 1 –  $S/d=4,0$ ; 2 –  $S/d=5,0$ ; 3 –  $S/d = 6,5$ .

Щодо пускової характеристики розглянутих пальникових пристроїв, то вони корелюються певним чином зі зривними характеристиками на бідному зриві, і погіршуються з ростом швидкості повітряного потоку і величини  $S/d$  (див. рис. 3.22)

### 3.7. Висновки за розділом

Основні результати дослідження з даного розділу можуть бути сформульовані таким чином:

1. Проведено зіставлення закономірностей протікання робочих процесів в стабілізаторних пальникових пристроях з плоскими та циліндричними стабілізаторами полум'я.
2. На основі багатопараметричного комп'ютерного моделювання визначено конструктивні та режимні параметри типоряду гладких циліндричних пальникових пристроїв потужністю 30-200 кВт.
3. Встановлено основні особливості структури течії палива й окиснювача в пальникових пристроях розглянутого типоряду.
4. Для пальників досліджуваного класу виявлено закономірності сумішоутворення палива і окиснювача.
5. Виконано комплекс досліджень, присвячений аналізу можливостей регулювання процесу сумішоутворення в пальниковому пристрої за допомогою зміни відстані  $L_1$  між устям пальника й місцем виходу газу з отворів.
6. Отримано експериментальні дані про пускові та зривні характеристики пальникових пристроїв при варіюванні їх конструктивних і режимних параметрів.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ З КІЛЬЦЕВИМИ ПРЯМОКУТНИМИ НІШАМИ

Цей розділ присвячено дослідженню робочих процесів в циліндричних пальникових пристроях з кільцевими нішами. Застосування останніх є з одного боку засобом інтенсифікації процесу горіння, з іншого – служить цілям покращення стабілізації полум'я завдяки захопленню вихора нішовою порожниною.

В даному розділі з метою вибору раціональних конструктивних параметрів типоряду циліндричних пальникових пристроїв з прямокутними кільцевими нішами проведено цикл досліджень процесів переносу в цих пристроях при варіюванні в певних межах їх основних геометричних характеристик, таких як розміри ніші, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора, крок між газоподавальними отворами та ін.

#### 4.1. Вибір розмірів кільцевої ніші для типоряду пальникових пристроїв

Одержання необхідних довжин нішових порожнин для пальників різної потужності базувалося на результатах досліджень закономірностей течії в даних пальниках. Щодо глибини ніші, то вона вибиралася з технологічних міркувань і залишалася однаковою для всього типоряду пальників ( $H = 0,006$  м).

На рис. 4.1 наведено до прикладу результати комп'ютерного моделювання картини течії палива та окиснювача в пальникових пристроях потужністю  $N_{\text{п}} = 30; 110; 155$  и  $200$  кВт за наявності нішової порожнини розміром  $L \times H = 0,03 \times 0,006$  м. Тут в першу чергу звертає на себе увагу той факт, що в усіх розглянутих пальникових пристроях протяжність первинного вихору в ніші виявляється помітно коротшою, ніж її довжина. При цьому чим менша потужність  $N_{\text{п}}$ , тим меншою є зазначена протяжність. Щодо місця розташування первинного вихору в



нішовій порожнині, то він для всіх значень  $N_{\text{п}}$  зміщений до передньої стінки ніші. Зона вихрової течії у задньої стінки ніші з ростом потужності  $N_{\text{п}}$  є все більш яскраво вираженою і зсувається з дна ніші до нішової кромки.

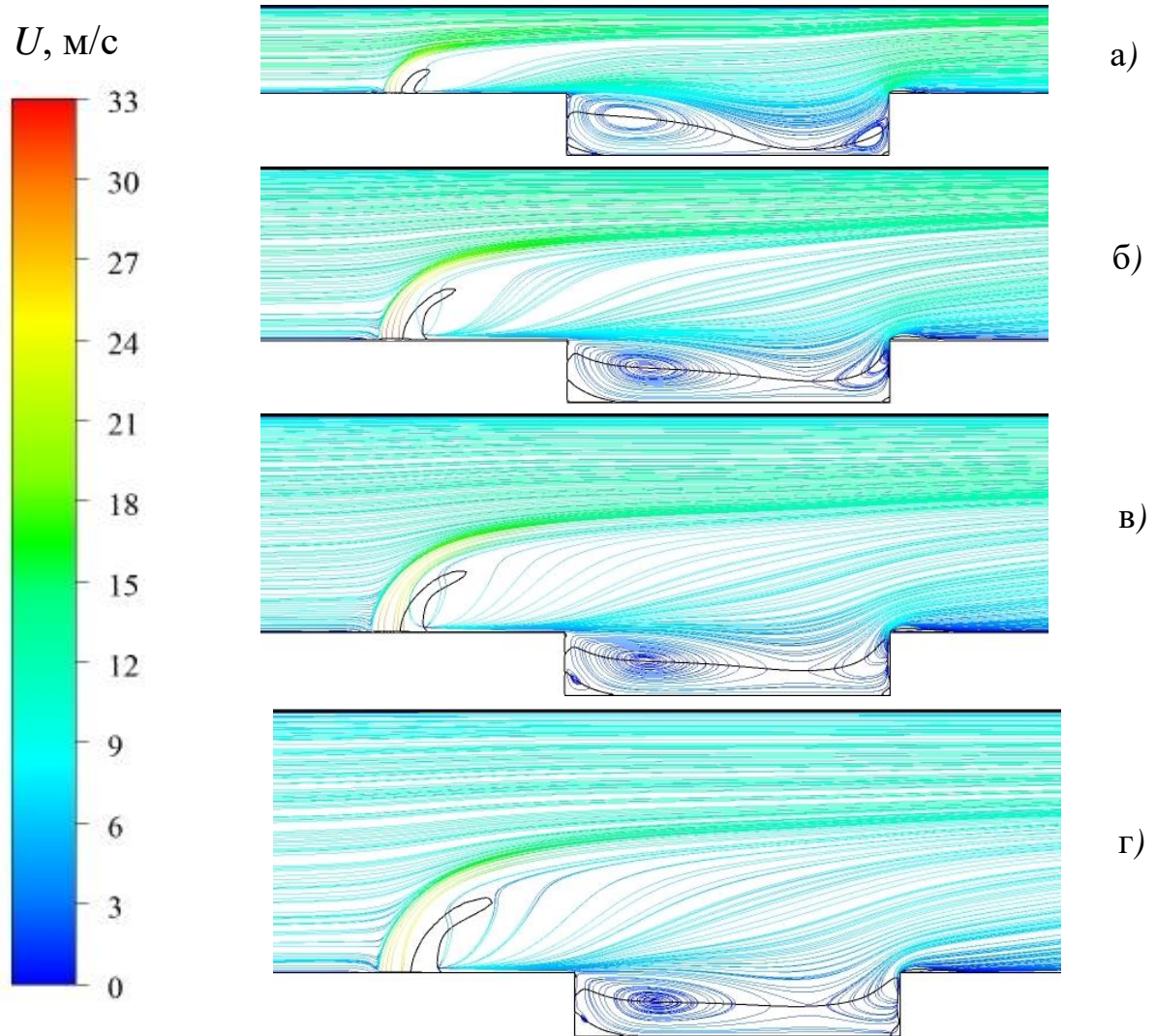


Рис. 4.1. Фрагмент ліній току в поздовжньому перерізі нішового пальникового пристрою, що проходить через вісь газоподавального отвору, для ніш розміром  $L \times H = 0,03 \times 0,006$  м за різних значень потужності пальників:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Для ефективного сумішоутворення і стабілізації полум'я в ніші зона первинного вихору в ній, як відомо, повинна займати основну частину простору ніші, і відповідно його протяжність не повинна значно відрізнятися від довжини  $L$

нішової порожнини. Згідно з отриманими даними, ніша довжиною  $L = 0,03$  м в розглянутих умовах не відповідає зазначеним вимогам. Довжина нішової порожнини, вочевидь, повинна бути коротшою, дещо збільшуючись з підвищенням потужності  $N_{\text{п}}$ . В табл. 4.1 наведено отримані в результаті обчислювальних досліджень рекомендовані значення абсолютної й відносної довжини кільцевої прямокутної ніші ( $\bar{L}=L/H$ ). Як видно з таблиці, відносна довжина  $\bar{L}$  для розглянутого типоряду пальників знаходиться в межах  $3 \leq \bar{L} \leq 4$ , що відповідає допустимому діапазону її зміни  $2,5 \leq \bar{L} \leq 5$ .

Таблиця 4.1

Абсолютні та відносні величини рекомендованих значень довжин нішової порожнини для типоряду циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв

$N_{\text{п}}$ , кВт	30	110	155	200
$L$ , м	0,018	0,021	0,0225	0,024
$\bar{L}$	3	3,5	3,75	4

Рис. 4.2 ілюструє картину руху палива та окиснювача в даних пальникових пристроях з рекомендованими значеннями розмірів ніш. Як видно, для всіх величин потужності  $N_{\text{п}}$  величини протяжності первинного вихору в нішовій порожнині лише трохи менші за її довжину, таким чином вихор займає основну частину цього простору. Останнє, як уже зазначалося, є однією з важливих умов сприятливого сумішоутворення та стабілізації полум'я в ніші.

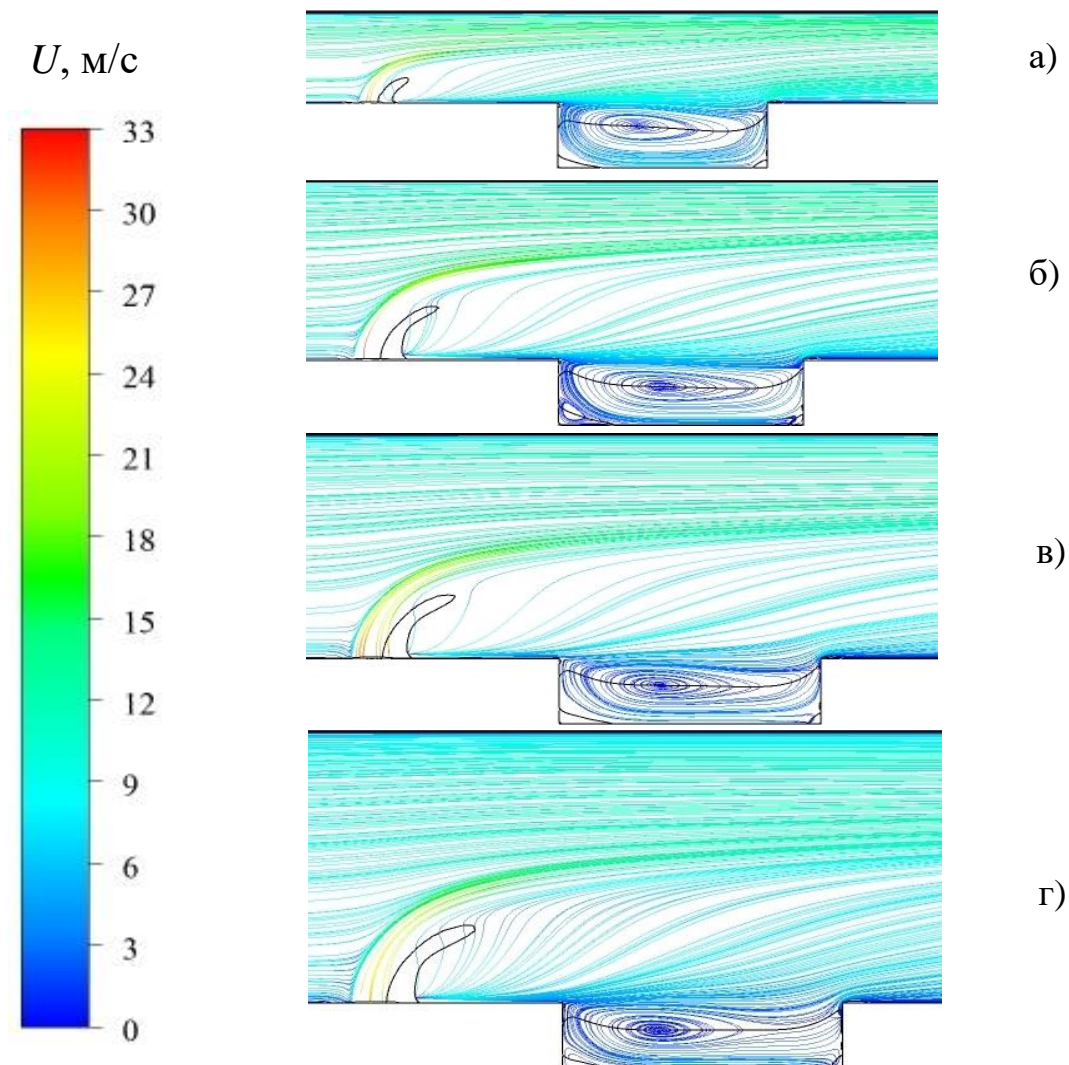


Рис. 4.2. Фрагмент ліній току в поздовжньому перерізі нішового пальникового пристрою, що проходить через вісь газоподавального отвору, при рекомендованих конструктивних параметрах нішових порожнин для різної потужності пальників:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

4.2 Визначення місця розташування нішової порожнини та відстані між струменями для типоряду досліджуваних пальникових пристроїв

Щодо вибору інших геометричних характеристик розглянутих пальникових пристроїв, то тут бралися до уваги наступні міркування. Результати виконаних досліджень показали, що в циліндричних пальниках з нішовими порожнинами при

збереженні їх конструктивних параметрів ( $S/d$ ,  $L_1$ , та ін.) такими ж, як і в разі відсутності ніш, картина сумішоутворення в нішовій порожнини виявляється сприятливою не для всіх значень потужності  $N_{\text{п}}$ . Так, при  $N_{\text{п}} = 155$  и  $200$  кВт значну частину нішової порожнини займають області з підвищеним вмістом повітря, див. наприклад рис. 4.3. (При цьому в зонах зворотних токів за стабілізатором суміш знаходиться в концентраційних межах займання). Дана обставина зумовлює необхідність зменшення кроку  $S/d$  між газоподавальними отворами в порівнянні з тим, який мав місце за відсутності ніші.

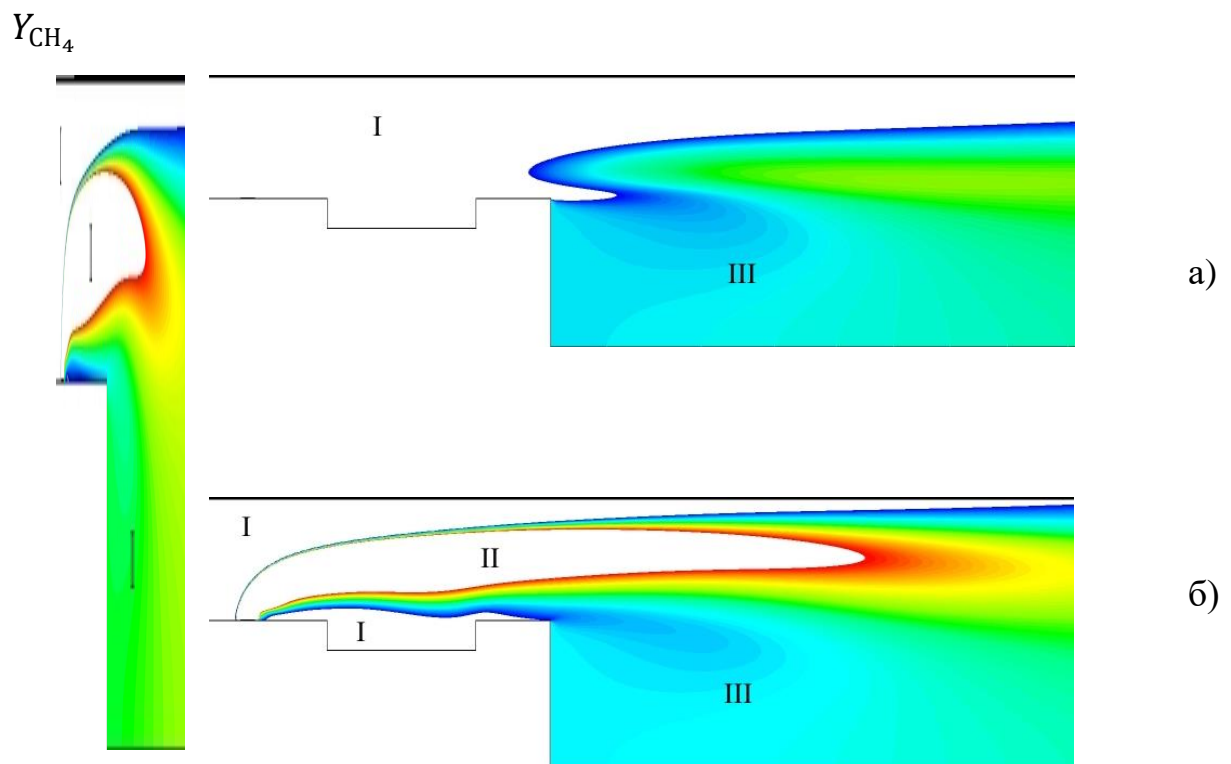


Рис. 4.3. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі циліндричного пальникового пристрою, що проходить через вісь газоподавального отвору  $\varphi = 0$  (а) і між отворами (б), за наявності нішової порожнини розміром  $L \times H = 0,03 \times 0,006$  для пальника потужністю  $N_{\text{п}} = 200$  кВт.

Як показали проведені дослідження, таке зменшення кроку  $S/d$  дійсно дозволяє забезпечити необхідне змішування палива й окиснювача в нішовій порожнини. Однак при цьому дещо погіршується картина сумішоутворення в зонах зворотних токів за стабілізатором. Тут горюча суміш, хоча і знаходиться в концентраційних межах займання, проте наближається до верхньої межі. Зважаючи

на це є доцільним деяке віддалення нішової порожнини від зривної кромки зі збільшенням потужності пального пристрою  $N_{п}$ .

У таблиці 4.2 наведені отримані в результаті виконаних досліджень конструктивні параметри типоряду циліндричних стабілізаторних пального пристроїв з прямокутними кільцевими нішами.

Таблиця 4.2

Основні конструктивні параметри типоряду циліндричних стабілізаторних пального пристроїв з нішовими порожнинами потужністю від 30 до 200 кВт

$N_{п}$ , кВт	$d_{ст}$ , м	$D$ , м	$d$ , м	$S/d$	$L_0$ , м	$L_1$ , м
30	0,02	0,0365	0,002	3,5	0,015	0,049
110	0,04	0,073	0,003	3,22	0,025	0,062
155	0,05	0,091	0,0035	3	0,05	0,0885
200	0,06	0,1095	0,004	2,94	0,06	0,1

Як впливає з зіставлення даних про рекомендовані конструктивні параметри пального пристроїв з нішами й без них (см. табл. 4.1 і 4.2), то у першому випадку з ростом потужності пального пристрою величина  $S/d$  повинна зменшуватися в цілому більш істотно. І, крім того, для нішових пального пристроїв змінною слід задавати відстань  $L_0$  від зривної кромки стабілізатора до ніші. Вона має збільшуватися від 0,015 м до 0,06 м з підвищенням потужності пального пристрою від 30 до 200 кВт.

4.3. Особливості робочих процесів мікрофакельних пального пристроїв з нішовими порожнинами

Нижче, на рис. 4.4-4.12 представлено характерні результати комп'ютерного моделювання процесів переносу в розглядуваних пального пристроях з нішами при одержаних раціональних конструктивних параметрах цих пристроїв.

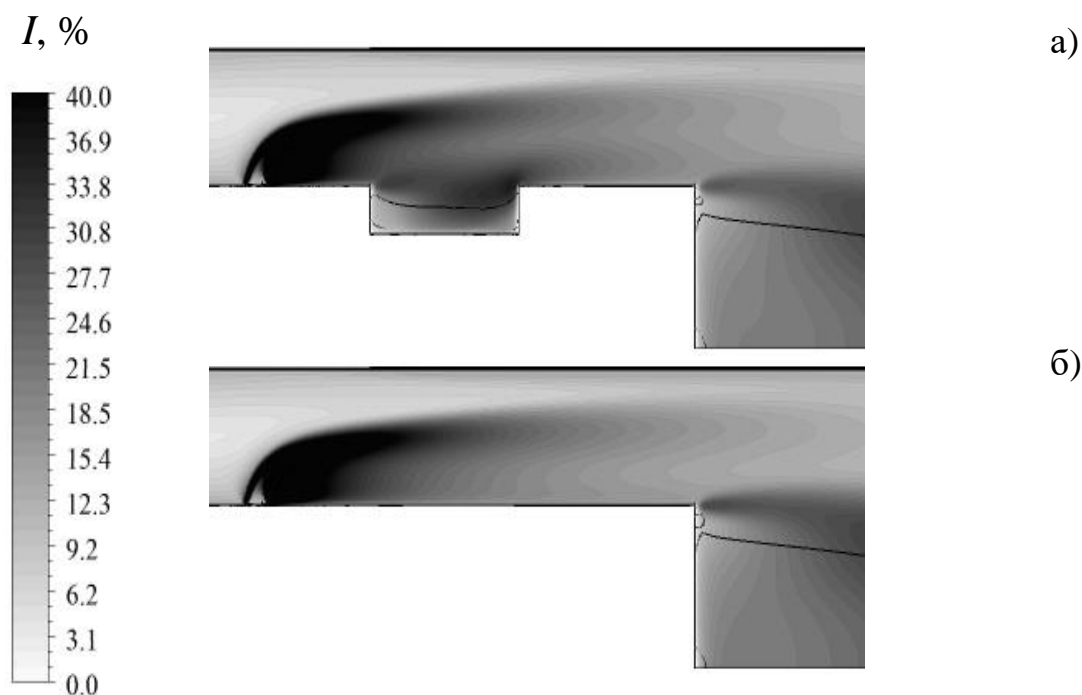


Рис. 4.4. Поля інтенсивності турбулентності в поздовжньому перерізі циліндричного стабілізаторного пальника  $\varphi = 0$ , який проходить через вісь газоподавального отвору, за наявності (а) та відсутності (б) нішової порожнини.

Рис. 4.4 - 4.7 ілюструють дані про поведінку інтенсивності турбулентності  $I$  у циліндричних пальникових пристроях з нішовими порожнинами та за їх відсутності. Наведені дані відповідають пальниковому пристрою потужністю  $N_{\text{п}} = 110$  кВт при наступних значеннях вихідних параметрів: витрата природного газу  $G_{\text{г}} = 11$  м<sup>3</sup>/год; коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ ;  $L_{\text{ст}} = 0,25$  м;  $L_1 = 0,062$  м;  $L_2 = 0,016$  м;  $d_{\text{ст}} = 0,04$  м;  $D = 0,073$  м;  $d = 0,003$  м;  $S/d = 3,22$ ; розміри прямокутної ніші  $L \times H = 0,021 \times 0,006$  м;  $h_0 = 0,0015$  м;  $h_1 = 0,003$  м; інтенсивність турбулентності повітря на вході в каналі  $I_{\text{в}} = 3\%$ , природного газу в поперечному перерізі газоподавальних отворів  $I_{\text{г}} = 3\%$ , абсолютна температура газу і повітря 300 К.

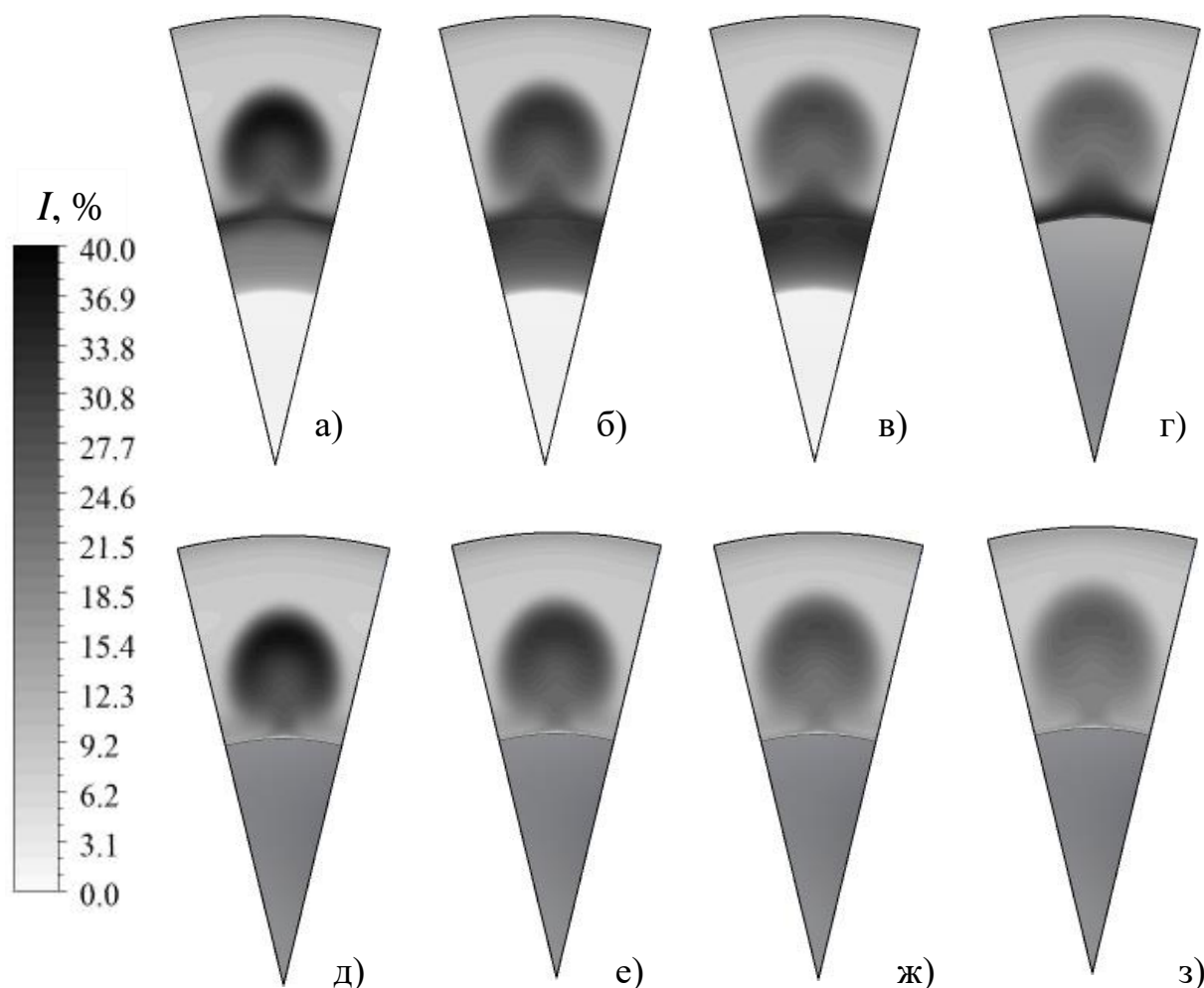


Рис. 4.5. Поля інтенсивності турбулентності в поздовжньому перерізі циліндричного стабілізаторного пальника  $x = \text{const}$  за наявності (а, б, в, г) і відсутності (д, е, ж, з) ніші: а, д –  $x = 0,0295$  м (чверть довжини ніші); б, е –  $x = 0,2145$  м (середина ніші); в, ж –  $x = 0,2195$  м (три чверті довжини ніші); г, з –  $x = 0,225$  м (задня стінка ніші).

Аналіз наведених результатів досліджень свідчить про те, що інтенсивність турбулентності в пальниках з нішею та за її відсутності може істотно відрізнятись як в якісному, так і в кількісному відношенні (рис. 4.4, 4.5, 4.6).

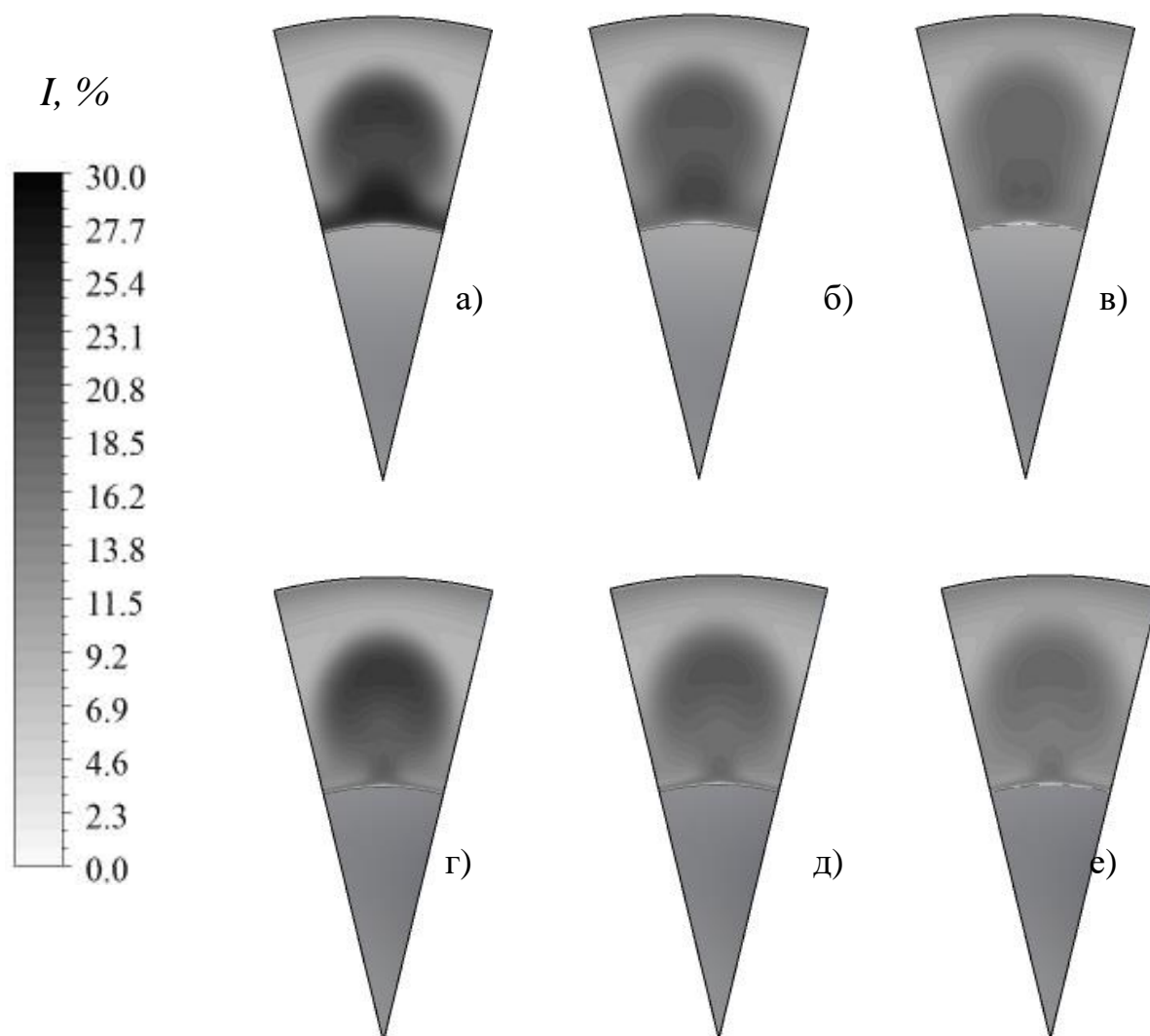


Рис. 4.6. Поля інтенсивності турбулентності в поперечному перерізі циліндричного стабілізаторного пальника  $x = const$  за наявності (а, б, в) і відсутності (г, д, е) ніші:  $x = 0,230$  м (а, г);  $x = 0,240$  м (б, д);  $x = 0,250$  м (в, е) - зривна кромка стабілізатора.



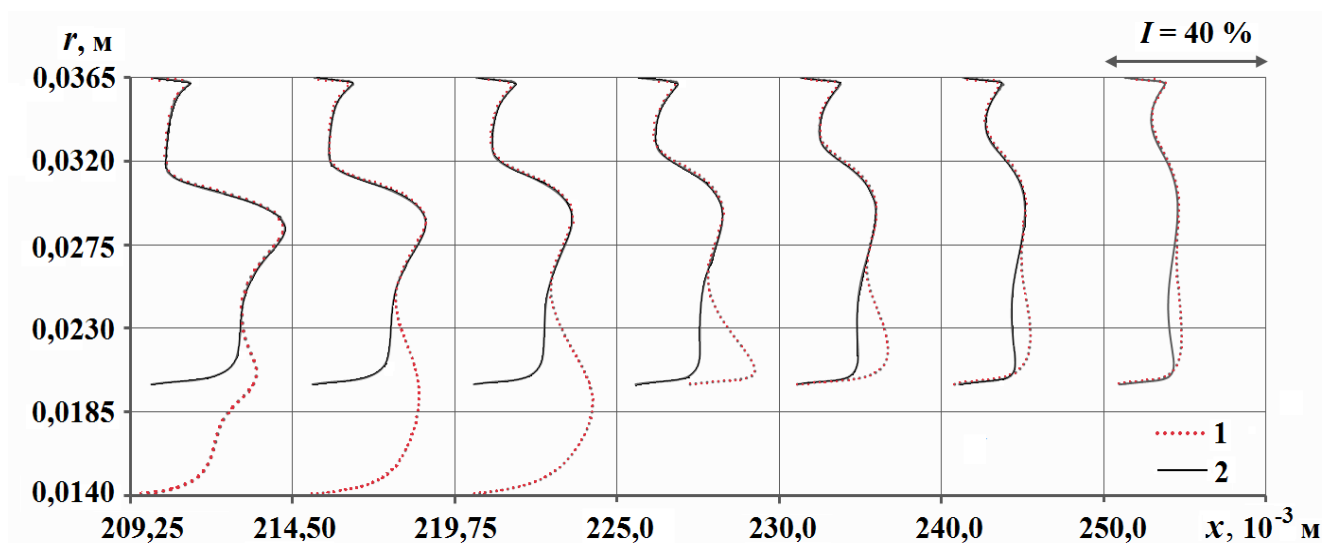


Рис. 4.7. Розподіл інтенсивності турбулентності за радіусом пальника потужністю  $N_{\text{п}} = 110$  кВт за наявності (1) і відсутності (2) кільцевої ніші для  $\varphi = 0$  у поперечних перерізах  $x = 0,20925$  м (чверть довжини ніші);  $x = 0,2145$  м (середина ніші);  $x = 0,21975$  м (три чверті довжини ніші);  $x = 0,225$  м (задня стінка ніші);  $x = 0,230$  м;  $x = 0,240$  м;  $x = 0,250$  м (зрівня кромка стабілізатора).

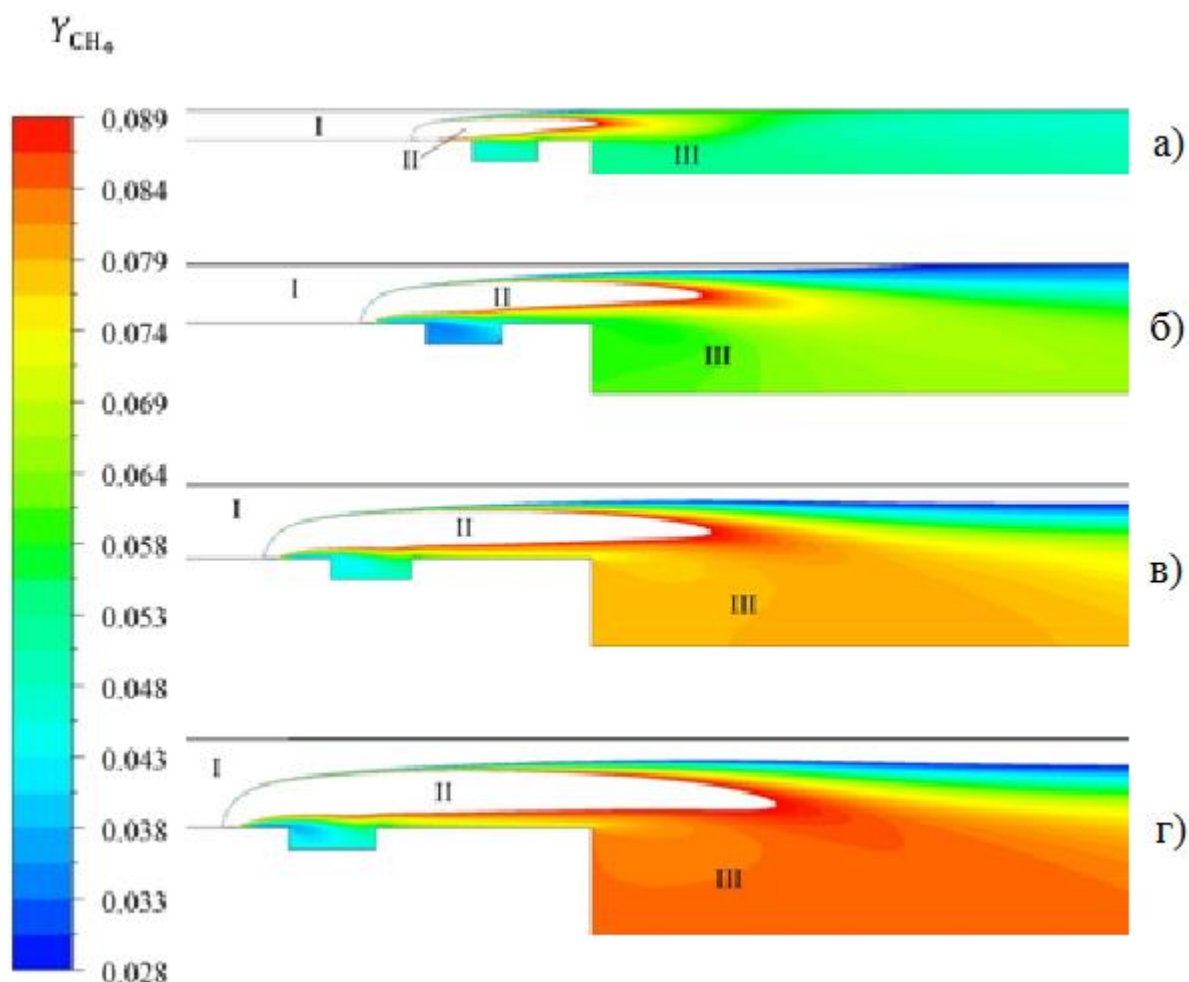


Рис. 4.8. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі циліндричного пального пристрою  $\varphi = 0$ , який проходить через вісь газоподавального отвору, за наявності нішових порожнин для палиників з раціональними конструктивними параметрами при різних значеннях потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Як видно з рис. 4.7, за відсутності нішової порожнини ( $x = 209,25 \cdot 10^{-3}$  м;  $214,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $219,75 \cdot 10^{-3}$  м) радіальні розподіли інтенсивності  $I$  характеризуються наявністю двох локальних максимумів. Перший з них розташований поблизу стінки каналу паличника і пов'язаний з пристінною турбулентністю, другий, більш яскраво виражений, відповідає осі газового струменя в зносячому потоці окиснювача. За наявності кільцевої ніші до зазначених максимумів додається ще один, розташований у власне нішовій порожнині і зумовлений наявністю так званого шару змішування.

Згідно з даними, які наведено на рисунках, наявність ніші помітно впливає на величину  $I$  поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора  $r = 0,02$  м. Цей вплив зменшується з віддаленням від даної поверхні (зі збільшенням радіуса  $r$ ), так що на деякій відстані від неї стає практично невідчутним. Причому, чим ближче розташований переріз  $x = const$  до вхідної кромки ніші, тим за менших значень  $r$  ( $r = r^*$ ) стають практично однаковими величини інтенсивностей турбулентності для ситуацій, що відповідають наявності й відсутності нішової порожнини. Так, при  $x=209,25 \cdot 10^{-3}$  м (чверть довжини ніші від передньої кромки) величина  $r^*$  складає приблизно 0,024 м, а при  $x=0,225$  м (задня стінка ніші)  $r^* = 0,26$ .

Таким чином, в зоні розташування ніші її вплив на інтенсивність турбулентності потоку локалізується на відстані 4-6 мм від зовнішньої поверхні стабілізатора  $r = 0,015$  м.

Униз по потоку за нішовою порожниною її вплив на величину  $I$  охоплює суттєво більші області по радіусу каналу (см. рис. 4.7). Наприклад, на зривний кромці стабілізатора даний вплив відчутно на відстані до 14 мм від зовнішньої поверхні стабілізатора.

Щодо величини відхилень значень інтенсивності турбулентності за наявності та відсутності нішової порожнини, то вони можуть бути значними. Так, у зовнішньому потоці в перерізі  $x = 0,225$  м, що відповідає задній стінці ніші, інтенсивність турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора майже вдвічі перевищує відповідні значення за відсутності ніші і становить приблизно 34%.

Необхідно також відзначити, що за результатами виконаних досліджень втрати тиску, пов'язані з наявністю кільцевої прямокутної ніші, незначні. А саме, для розглянутих умов в разі відсутності нішової порожнини втрати тиску  $\Delta P$  в пальнику складають 61,0 Па, а за наявності ніші – 69,0 Па. Тобто, зазначені втрати збільшуються тільки на 8,0 Па.

Характерні результати дослідження процесів сумішоутворення для розглянутих пальникових пристроїв наведені на рис. 4.8 и 4.9. Як слідує з отриманих даних, зміна картини сумішоутворення з ростом потужності нішового

пальника схожа з тією, що відповідає випадку відсутності нішової порожнини. А саме, з підвищенням потужності  $N_{\text{п}}$  інтенсивність сумішоутворення в пальниковому пристрої знижується.

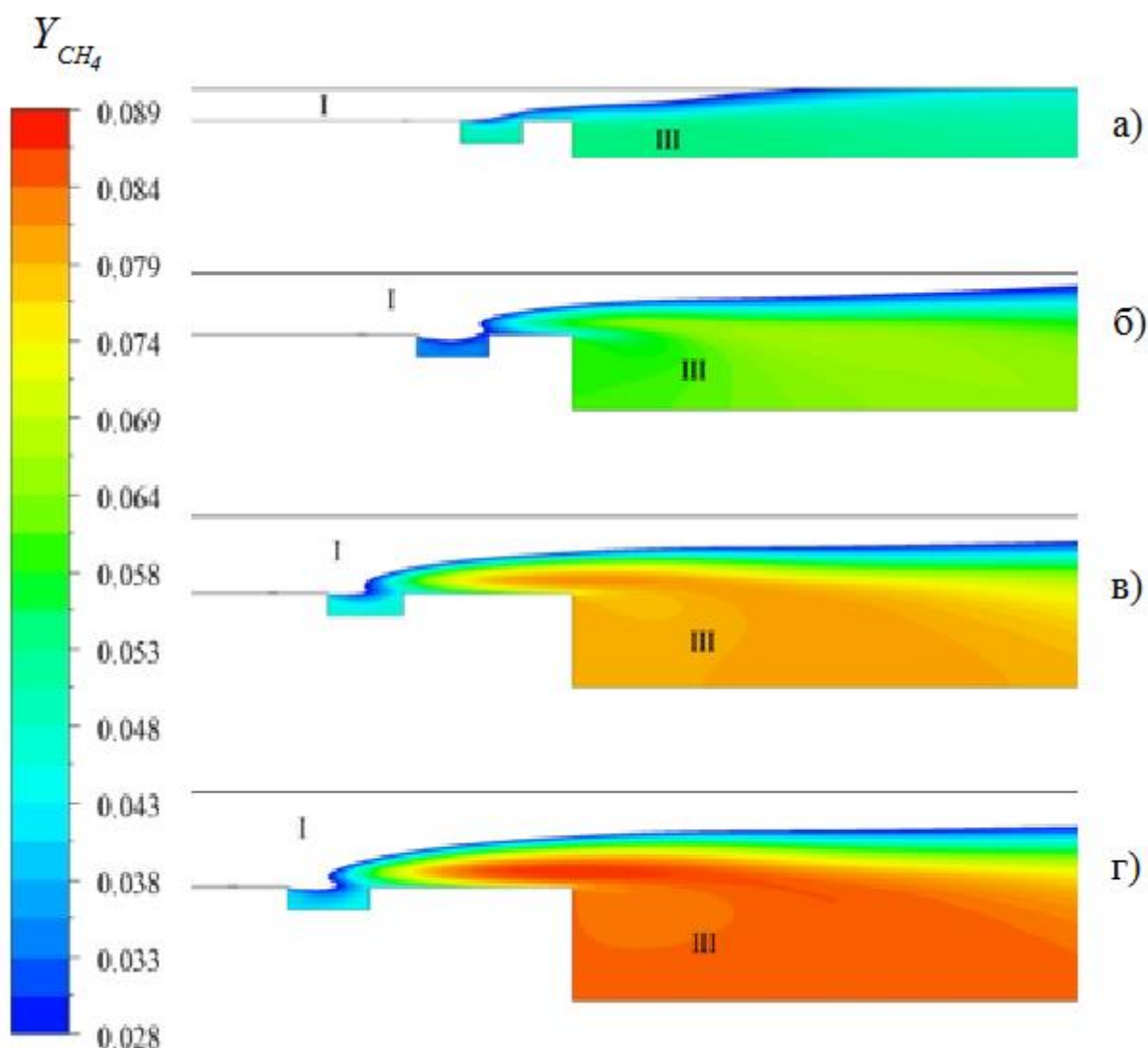


Рис. 4.9. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі циліндричного пальникового пристрою, що проходить посередині між газоподавальними отворами, за наявності нішових порожнин для пальників з раціональними конструктивними параметрами при різних значеннях потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Так, в поперечному перерізі, що проходить через задню кромку стабілізатора, стан горючої суміші трансформується від такого, що практично відповідає

концентраційним межах займання при  $N_{\text{п}} = 30$  кВт до такого, коли суміш, що знаходиться в цих межах, займає лише відносно невелику частину даного перерізу при  $N_{\text{п}} = 200$  кВт. Однак, за наявності нішових порожнин вказане зниження інтенсивності сумішоутворення не є настільки значним, як в пальниках без таких порожнин (см. рис. 3.16, 4.8). Це зумовлено, головним чином, турбулізуючою дією власне ніші та віддаленням газподавальних отворів від зривної кромки стабілізатора відповідно до вимоги організації необхідної картини сумішоутворення як в нішовій порожнині, так і в зоні зворотних токів за стабілізатором.

На рис. 4.10 представлено поля температур для циліндричних пальникових пристроїв з кільцевою нішею та за її відсутності. Як видно, в першій із зазначених ситуацій горіння починається у власне нішовій порожнині, поширюється уздовж зовнішньої поверхні стабілізатора і далі продовжується в його закормовій області. За відсутності кільцевої ніші початок горіння відповідає зривній кромці стабілізатора.

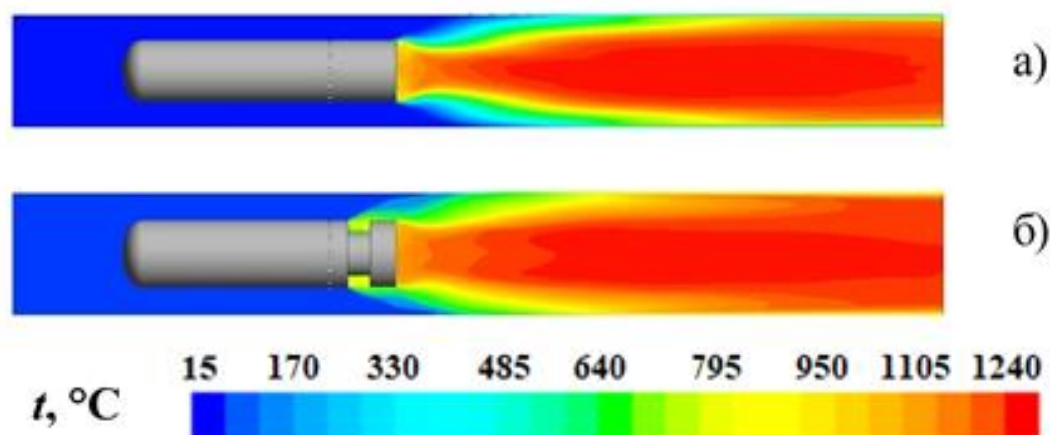


Рис. 4.10. Поля температур в поздовжніх перерізах, що проходять через вісь газоподавального отвору, для пальникового пристрою з циліндричним стабілізатором полум'я, за відсутності (а) та наявності (б) кільцевої прямокутної ніші.

Такий характер процесу горіння в ситуаціях, що зіставляються, зумовлює більш високу інтенсивність вигорання палива і дещо більшу рівномірність поля

температур в поперечних перерізах факела для пальників з кільцевими прямокутними нішами (см. рис. 4.11., 4.12).

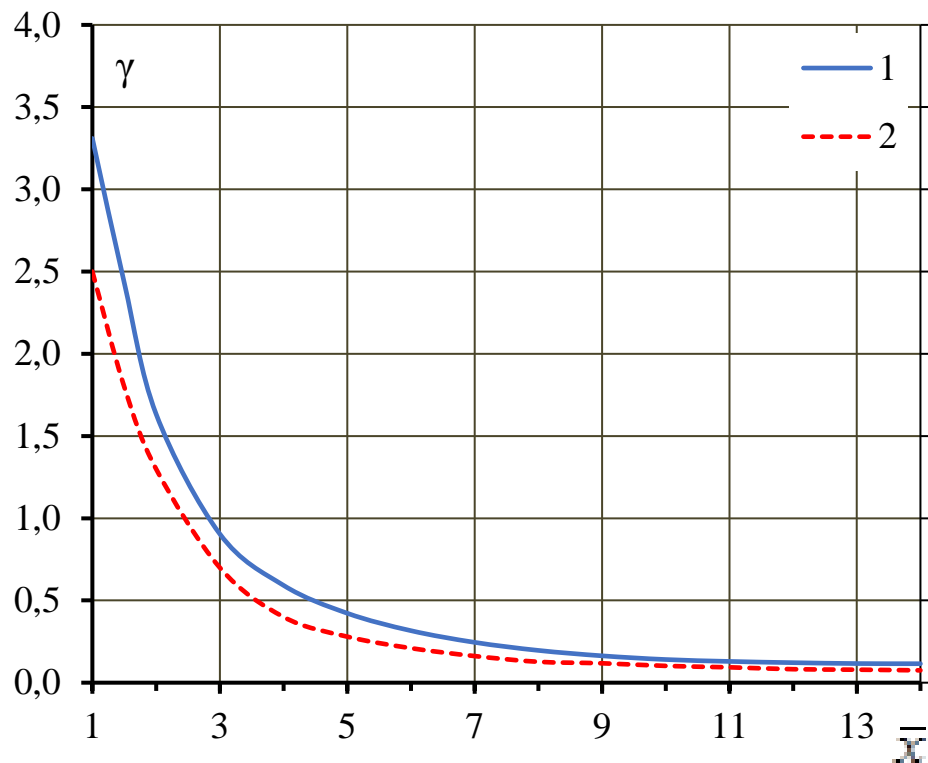


Рис. 4.11. Відносна нерівномірність поля температур  $\gamma$  у поперечних перерізах факела для циліндричного пальникового пристрою за відсутності (1) і наявності (2) кільцевої прямокутної ніші.

Слід також підкреслити, що згідно з результатами виконаних досліджень, наявність нішових порожнин в циліндричних пальникових пристроях зумовлює покращення стабілізації полум'я на «бідному» зриві, що є важливим для експлуатації пальникових пристроїв на пускових режимах.

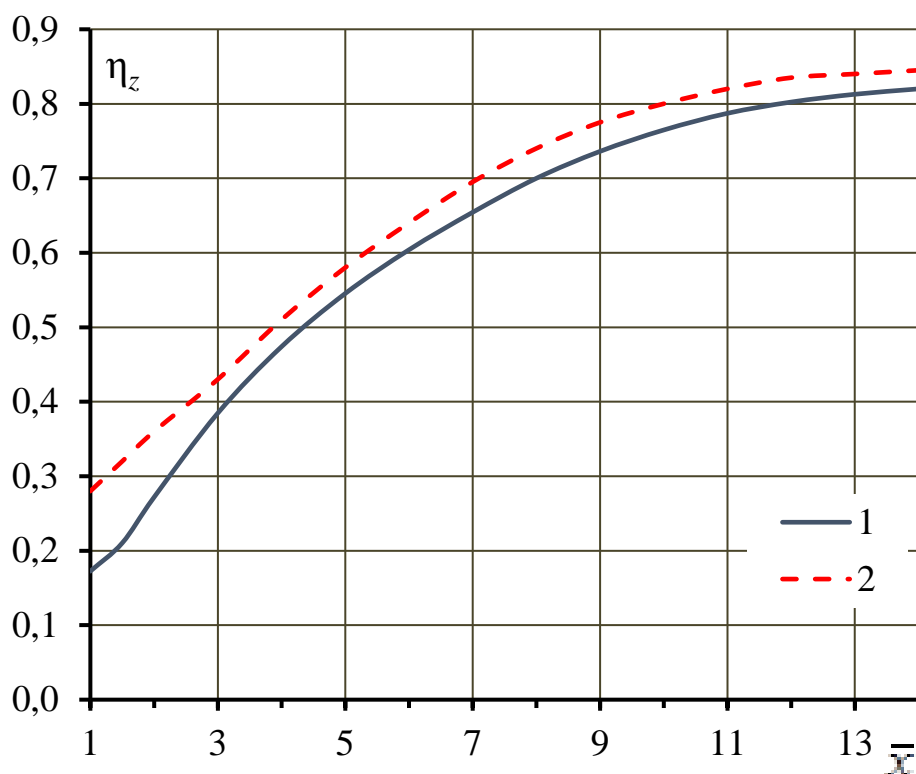


Рис. 4.12. Зміна коефіцієнта повноти згоряння палива по довжині факела для циліндричного пальникового пристрою за відсутності (1) і наявності (2) кільцевої прямокутної ніші.

При цьому дане покращення виявляється тим більш значним, чим більше потужність пальникового пристрою з розглянутого типоряду. Так, значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{\max}$  на бідному зриві за рахунок застосування нішових порожнин збільшується на 16% за потужності пальникового пристрою 30 кВт і на 24% - за потужності 200 кВт.

#### 4.4. Висновки за розділом

За результатами виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Для модифікації типоряду циліндричних пальникових пристроїв з кільцевими прямокутними нішами на базі проведених досліджень структури течії визначено необхідні геометричні характеристики нішових порожнин.

2. Виконано комплекс досліджень процесів переносу в циліндричних пальниках з нішовими порожнинами і на цій основі для типоряду пальників, що розглядався, здійснено вибір їх раціональних конструктивних параметрів, таких як розташування нішової порожнини відносно зривної кромки стабілізатора, крок між газоподавальними отворами та ін.
3. Одержано дані про особливості протікання робочих процесів в циліндричних пальниках з кільцевими нішами. Встановлено, що наявність нішових порожнин призводить до деякої інтенсифікації процесу горіння і поліпшення умов стабілізації полум'я.
4. Виконано порівняльний аналіз робочих процесів в циліндричних пальникових пристроях за наявності і відсутності нішових порожнин.



## РОЗДІЛ 5

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТУРБУЛІЗАТОРІВ ПОТОКУ

В даному розділі розглядаються результати досліджень робочих процесів в циліндричних пальникових пристроях з пластинчастими турбулізаторами полум'я, які розташовано на зривній кромці стабілізатора. Застосування таких турбулізаторів покликане інтенсифікувати процес горіння в пальникових пристроях класу, що розглядається.

#### 5.1. Особливості течії в пальниках з турбулізаторами потоку

В таблиці 5.1 наведено основні характеристики пластинчастих турбулізаторів потоку для типоряду пальників, який розглядається. Ширина турбулізаторів  $B_T$  вибиралася з міркувань, згідно з якими коефіцієнт захарачення турбулізаторами прохідного перерізу каналу для пальникових пристроїв різної потужності повинен бути однаковим і складати приблизно 0,2. Товщина турбулізаторів приймалася рівною  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Щодо кількості турбулізаторів, то як видно з табл. 5.1, реалізовувалася тенденція до збільшення їхньої кількості з підвищенням потужності пальникового пристрою.

Зупинимося спочатку на розгляді особливостей течії палива й окиснювача в пальниках з турбулізаторами потоку. На рис. 5.1-5.7 наведено характерні дані комп'ютерного моделювання для ситуацій, що відповідають наявності та відсутності турбулізаторів потоку на зривних кромках стабілізатора пальникового пристрою потужністю 110 кВт.

На рис. 5.1 представлено результати чисельних досліджень, які ілюструють структуру течії палива та окиснювача в двох розглянутих ситуаціях. Як видно, за відсутності турбулізаторів має місце одна зона рециркуляції безпосередньо за торцевою поверхнею стабілізатора. У разі ж наявності турбулізаторів за кожним з

них утворюється зона рециркуляції. При цьому протяжність цих зон по потоку істотно перевищує відповідну протяжність зони рециркуляції за торцем стабілізатора в умовах, коли на його кромках не встановлено турбулізатори потоку. Так, за умов, що розглядаються,  $L_{\text{від}}$  складає 0,116 м для турбулізаторів і 0,0475 – для зони за торцем стабілізатора.

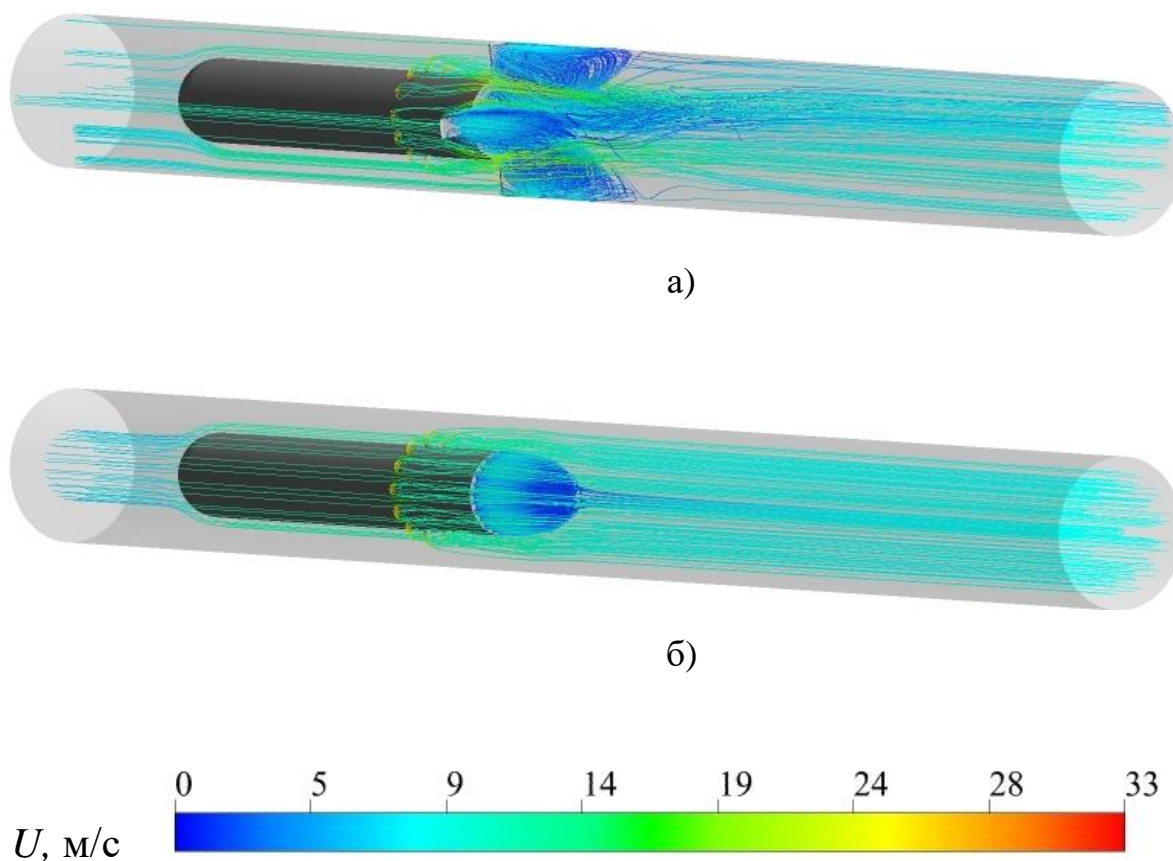


Рис. 5.1. Картина ліній току для циліндричного пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) і відсутності (б) турбулізаторів потоку.

З приводу тривимірного характеру течії в ситуаціях, що зіставляються, необхідно відзначити таке. Якщо в разі відсутності турбулізаторів він зумовлений головним чином газовими струменями, то за їх наявності - як ними, так і власне турбулізаторами потоку.

Таблиця 5.1

Кількість  $n$  і ширина  $B_T$  пластинчастих турбулізаторів потоку, що встановлюються на зривних кромках стабілізаторів полум'я, для типоряду циліндричних пальникових пристроїв потужністю 30-200 кВт

$N_p$ , кВт	$n$	$B_T$ , $10^{-3}m$
30	3	6
110	4	9
155	5	9
200	5	11

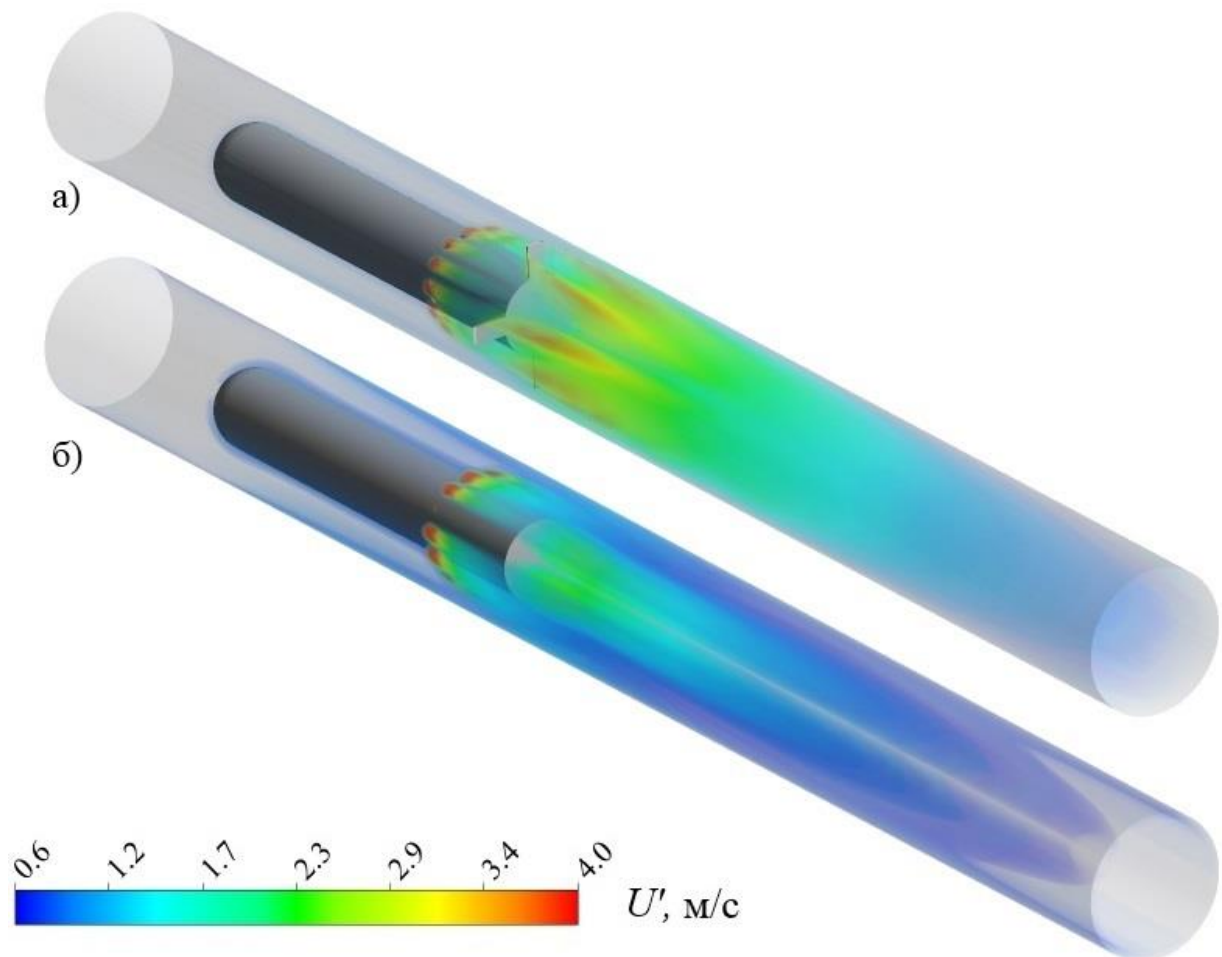


Рис. 5.2. Об'ємні поля середньоквадратичних пульсацій швидкості  $U'$  для циліндричного пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) і відсутності (б) турбулізаторів потоку.

На рис. 5.2 - 5.7 наведено дані комп'ютерного моделювання для пальників з турбулізаторами потоку і без них щодо поведінки пульсаційних складових швидкостей. Тут, перш за все, звертає на себе увагу той факт, що за наявності турбулізаторів спостерігається істотно більш високий рівень пульсацій швидкості в значній частині потоку за стабілізатором полум'я. При цьому значно вищим виявляється і максимальний рівень пульсацій швидкості. Для ситуацій, що зіставляються, ці рівні складають 4,5 м/с і 2,8 м/с.

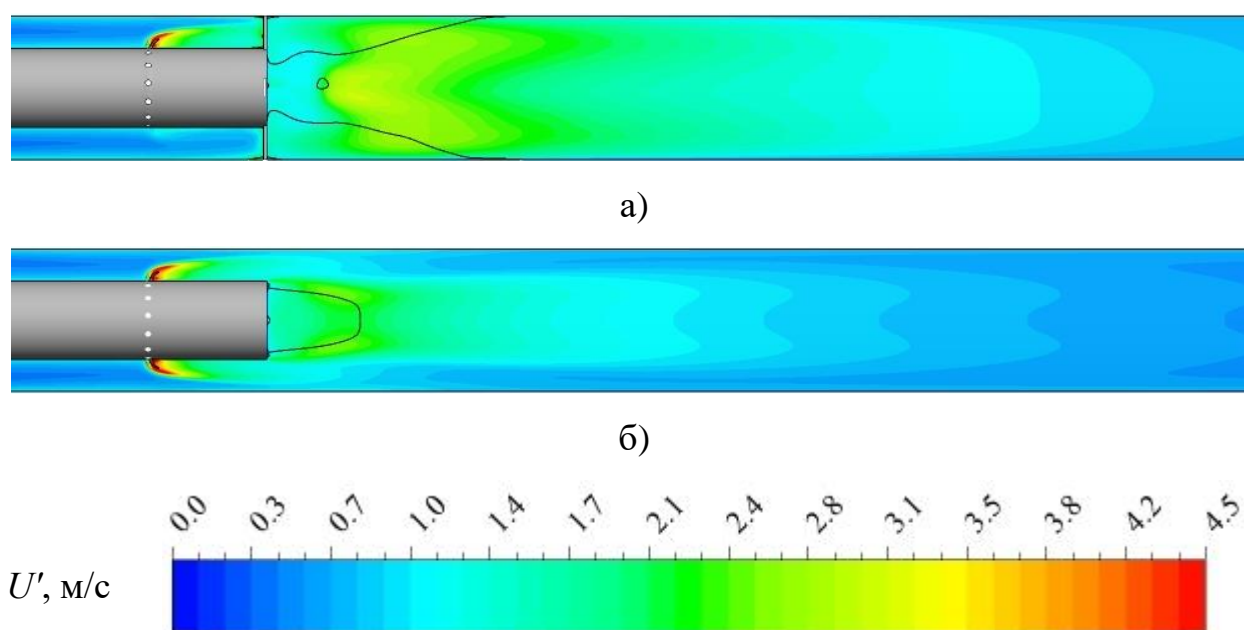


Рис. 5.3. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  у поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавальних отворів, для циліндричного пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) та відсутності (б) турбулізаторів потоку.

Істотно відрізняється для порівнюваних умов і характер полів пульсацій швидкості. За відсутності турбулізаторів зони з підвищеним рівнем пульсацій розташовуються в центральній частині каналу, яка відповідає зонам рециркуляції потоку. У разі встановлення турбулізаторів на зривний кромці стабілізатора максимальний рівень пульсацій спостерігається на межах зон зворотних токів за кожним з чотирьох турбулізаторів полум'я. Із віддаленням від торця стабілізатора вниз по потоку межі зон підвищеної турбулізації дещо різні.

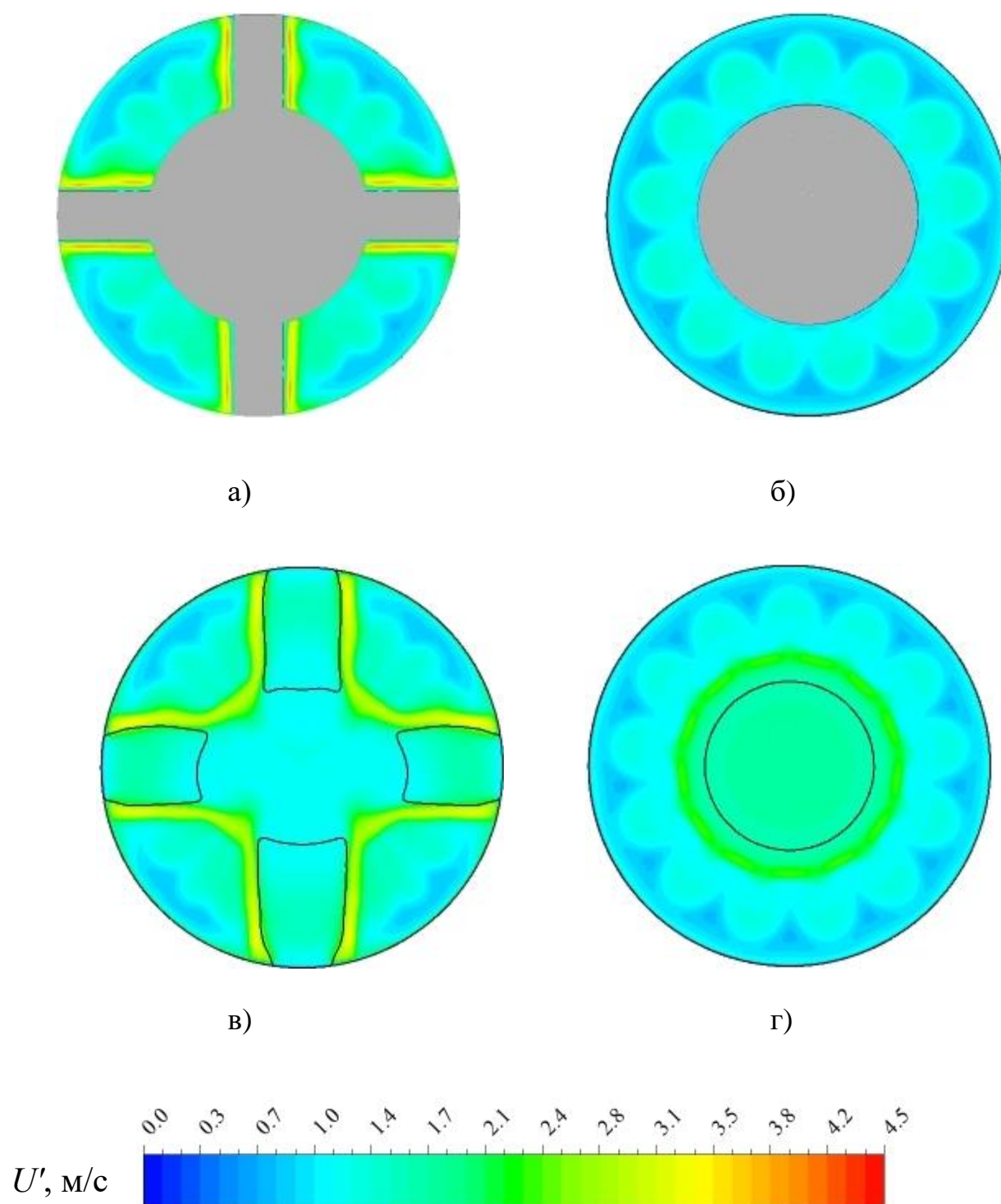


Рис. 5.4. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечних перерізах  $x = 0,25$  м (а, б) і  $x = 0,26$  м (в, г) для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а, в) і відсутності (б, г) турбулізаторів потоку.

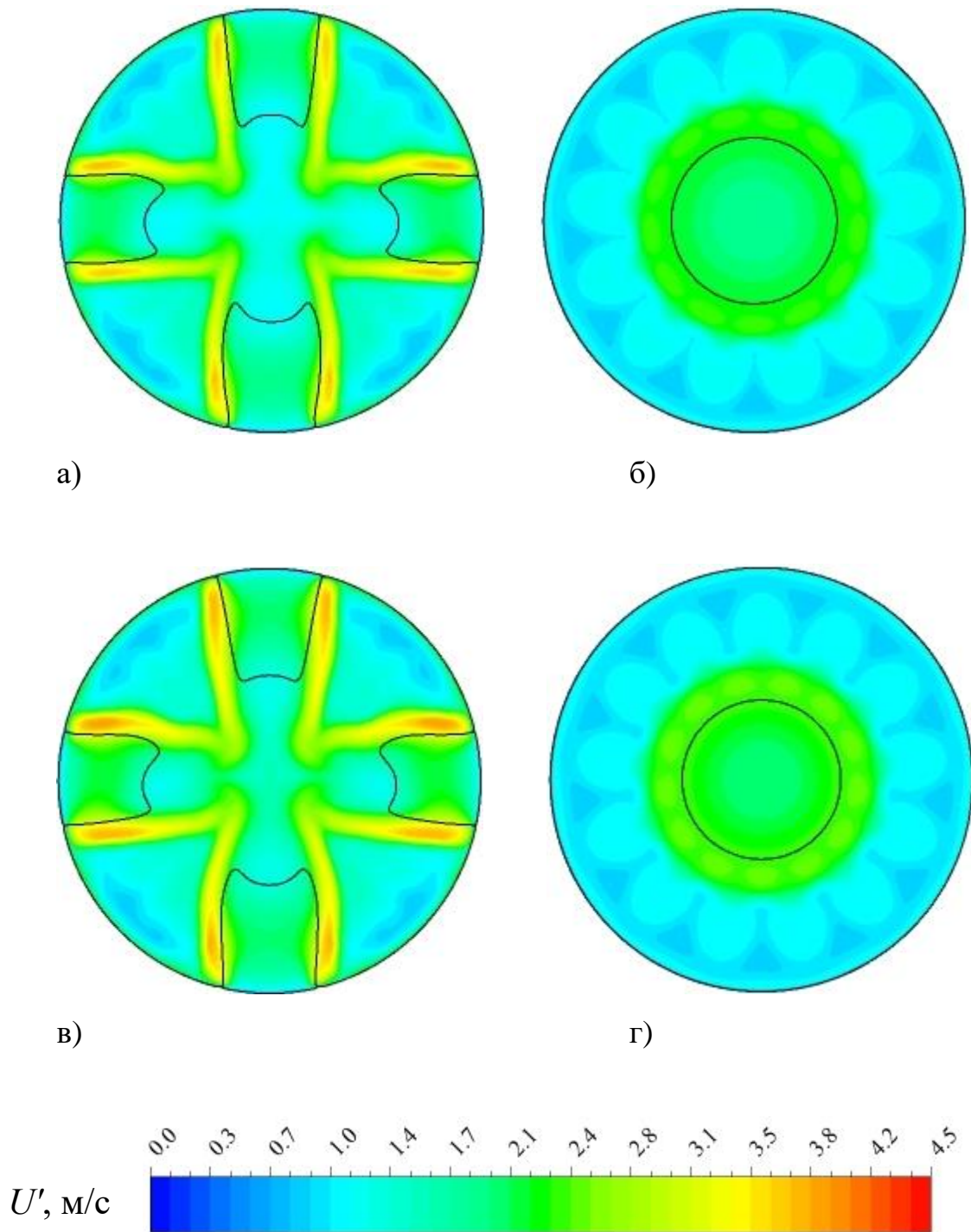


Рис. 5.5. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечних перерізах  $x = 0,27$  м (а, б) і  $x = 0,275$  м (в, г) для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а, б) і відсутності (б, г) турбулізаторів потоку.

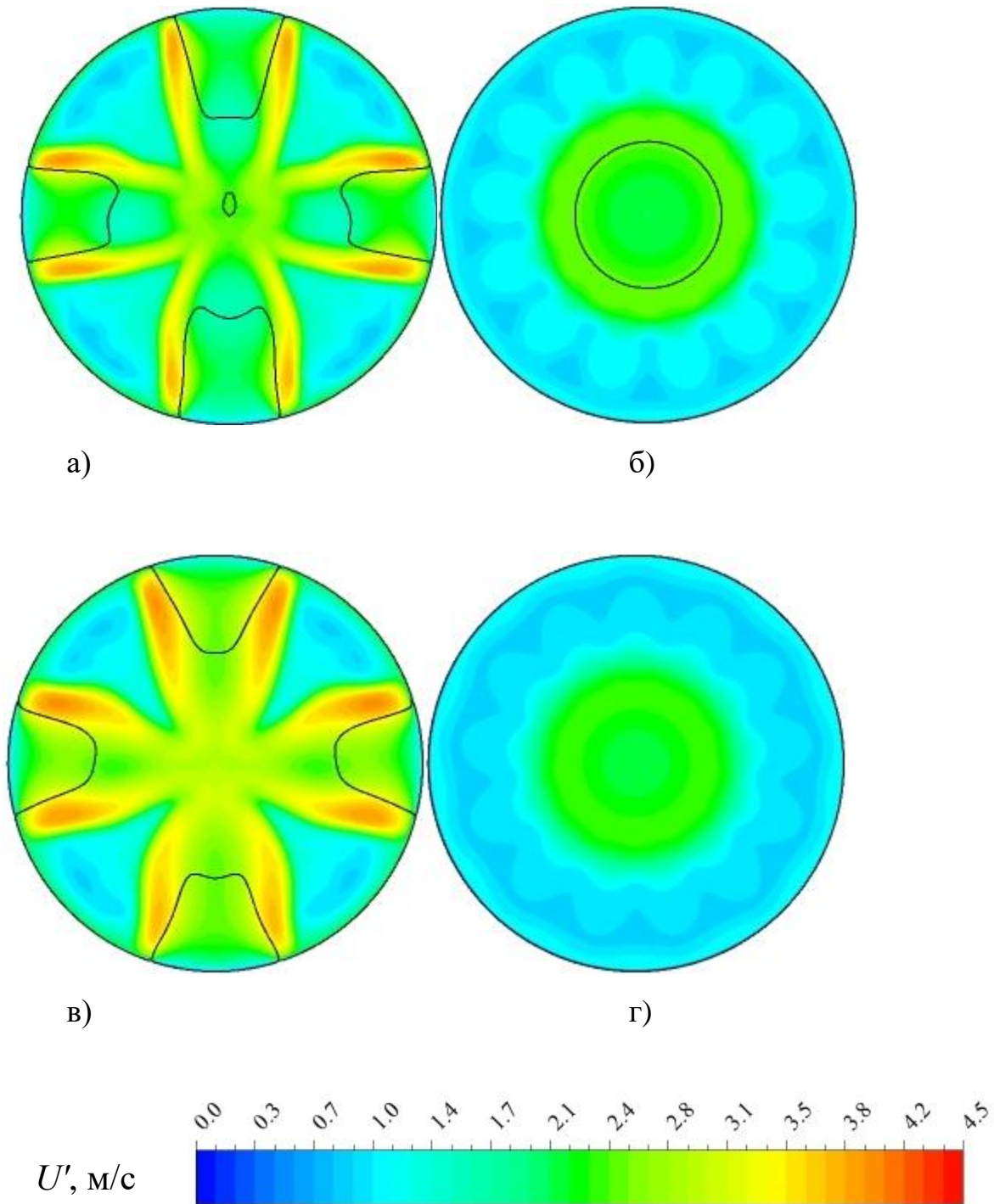


Рис. 5.6. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечних перерізах  $x = 0,28$  м (а, б) і  $x = 0,3$  м (в, г) для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а, б) і відсутності (б, г) турбулізаторів потоку

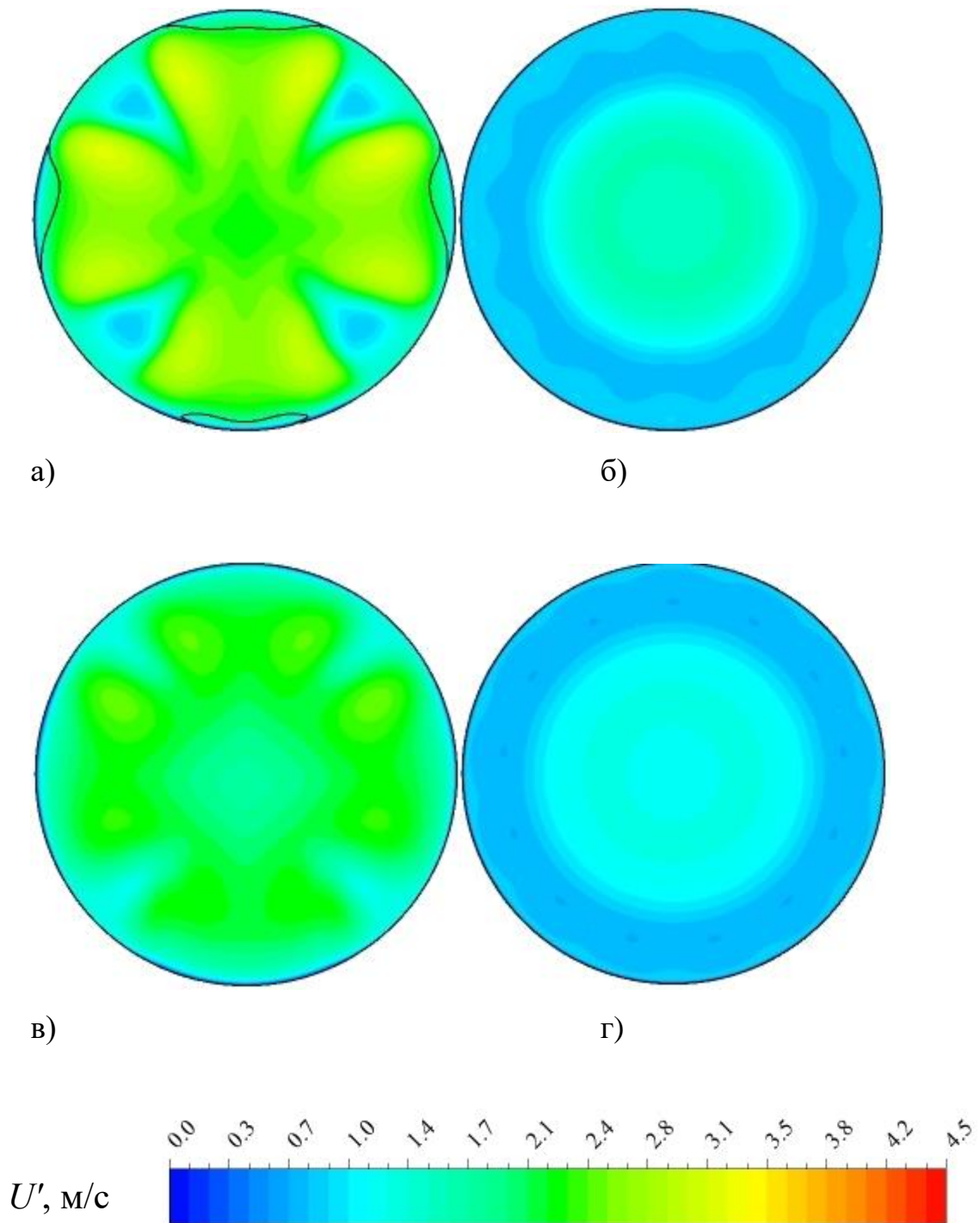


Рис. 5.7. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечних перерізах  $x = 0,35 \text{ м}$  (а, б) і  $x = 0,4 \text{ м}$  (в, г) для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а, б) і відсутності (б, г) турбулізаторів потоку

На рис. 5.8 - 5.16 представлено дані комп'ютерного моделювання, щодо закономірностей течії палива й окиснювача для пальників з турбулізаторами потоку різної потужності. Як випливає з отриманих даних, кількість зон



рециркуляції відповідає кількості турбулізаторів потоку і становить 3, 4, 5 і 5 для пальників потужністю 30, 110, 155 і 200 кВт.

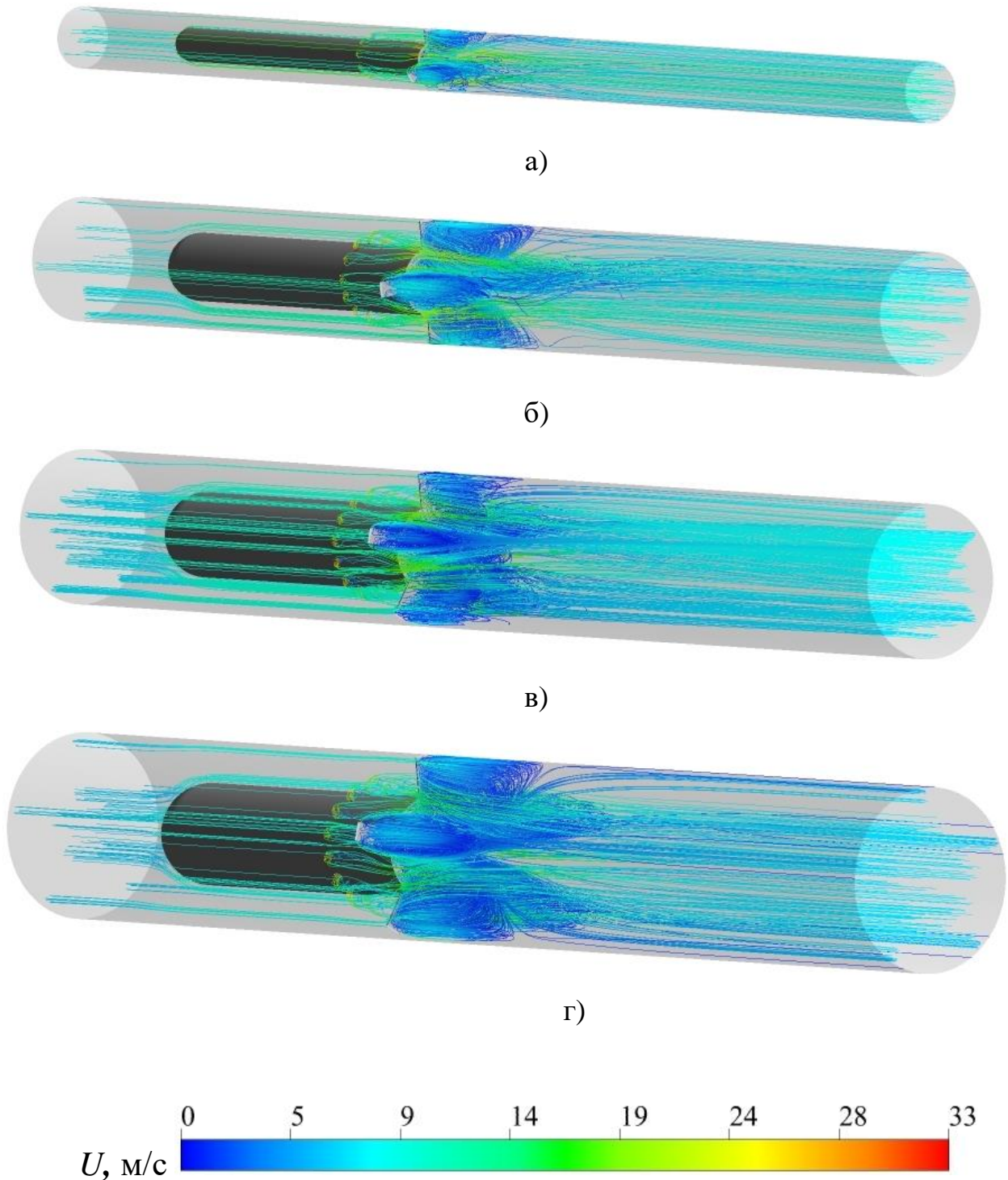


Рис. 5.8. Картина ліній току для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

Для пальників різної потужності турбулізація потоку виявляється найбільш

суттєвою поблизу меж зон зворотних токів, які реалізуються за всіма турбулізаторами (див. 5.11-5.15).

На деякій відстані від зривної кромки стабілізатора  $x > 0,55$  м на осі турбулентного сліду за стабілізатором полум'я найнижчий рівень інтенсивності турбулентності відповідає пальнику потужністю 30 кВт, помітно вищий – пальнику потужністю 110 кВт. Щодо пальника потужністю 155 і 200 кВт слід відмітити, що тут інтенсивність турбулентності є практично однаковою (рис. 5.16).

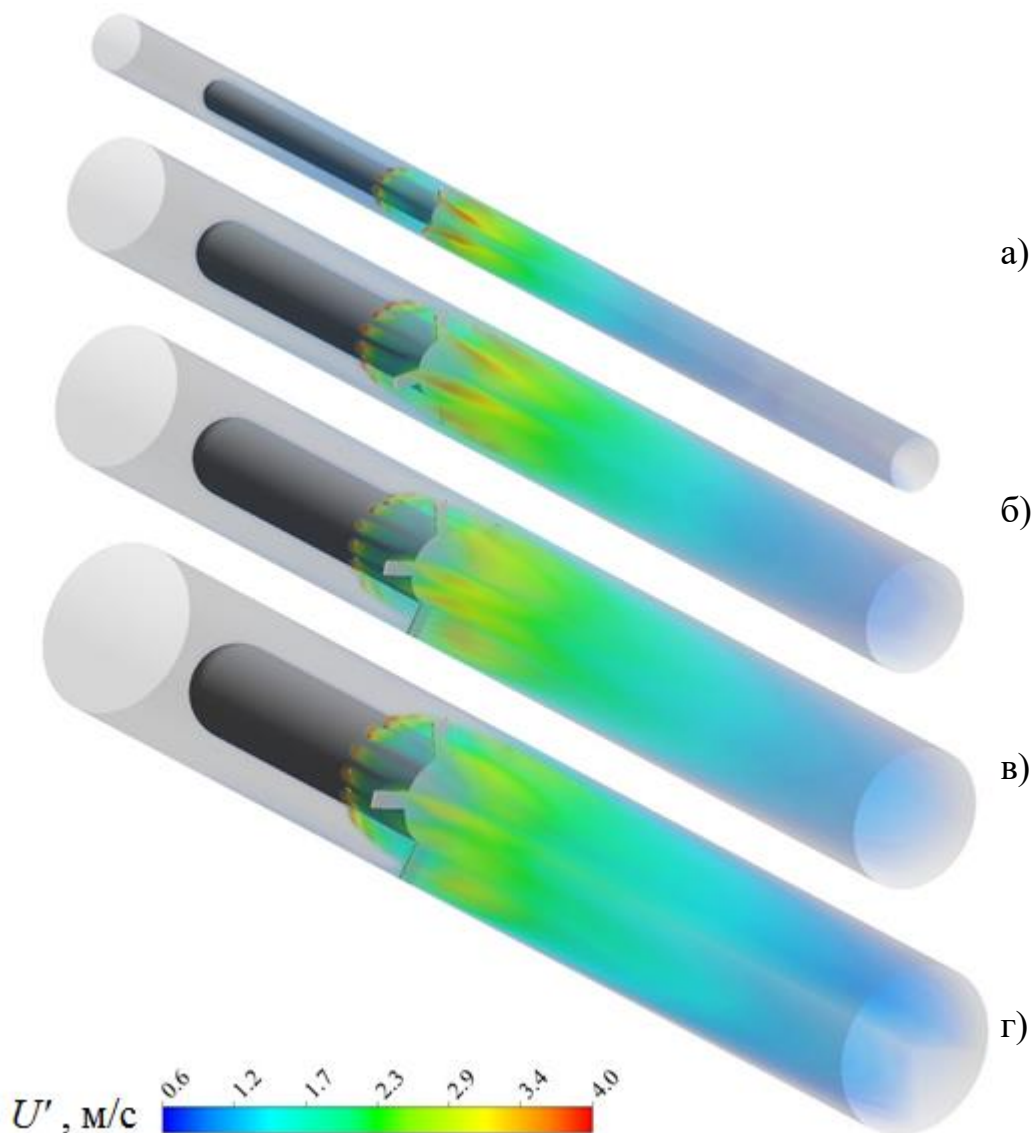


Рис. 5.9. Об'ємні поля середньоквадратичних пульсацій швидкості для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

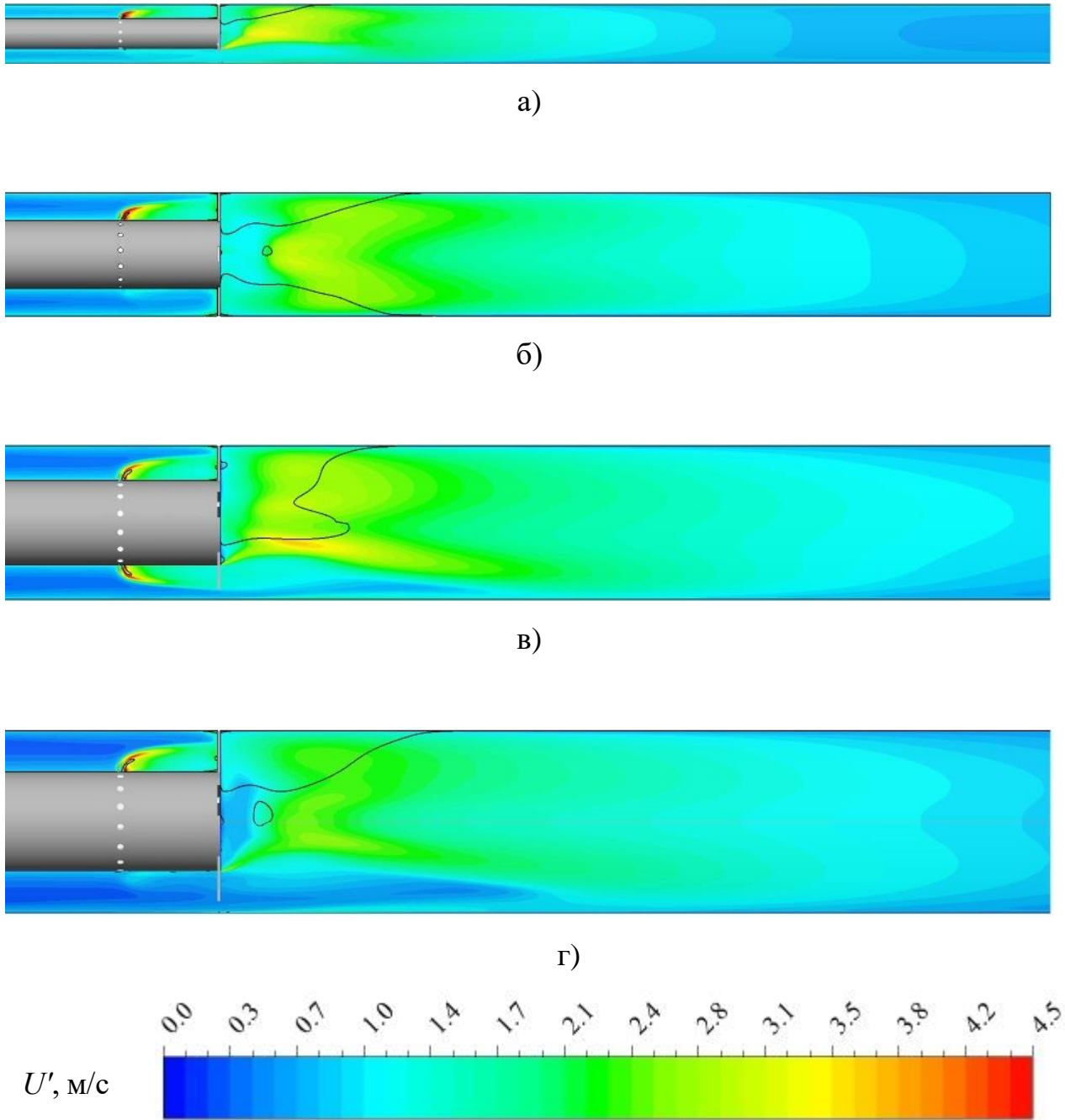


Рис. 5.10. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  у поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавального отвору, для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

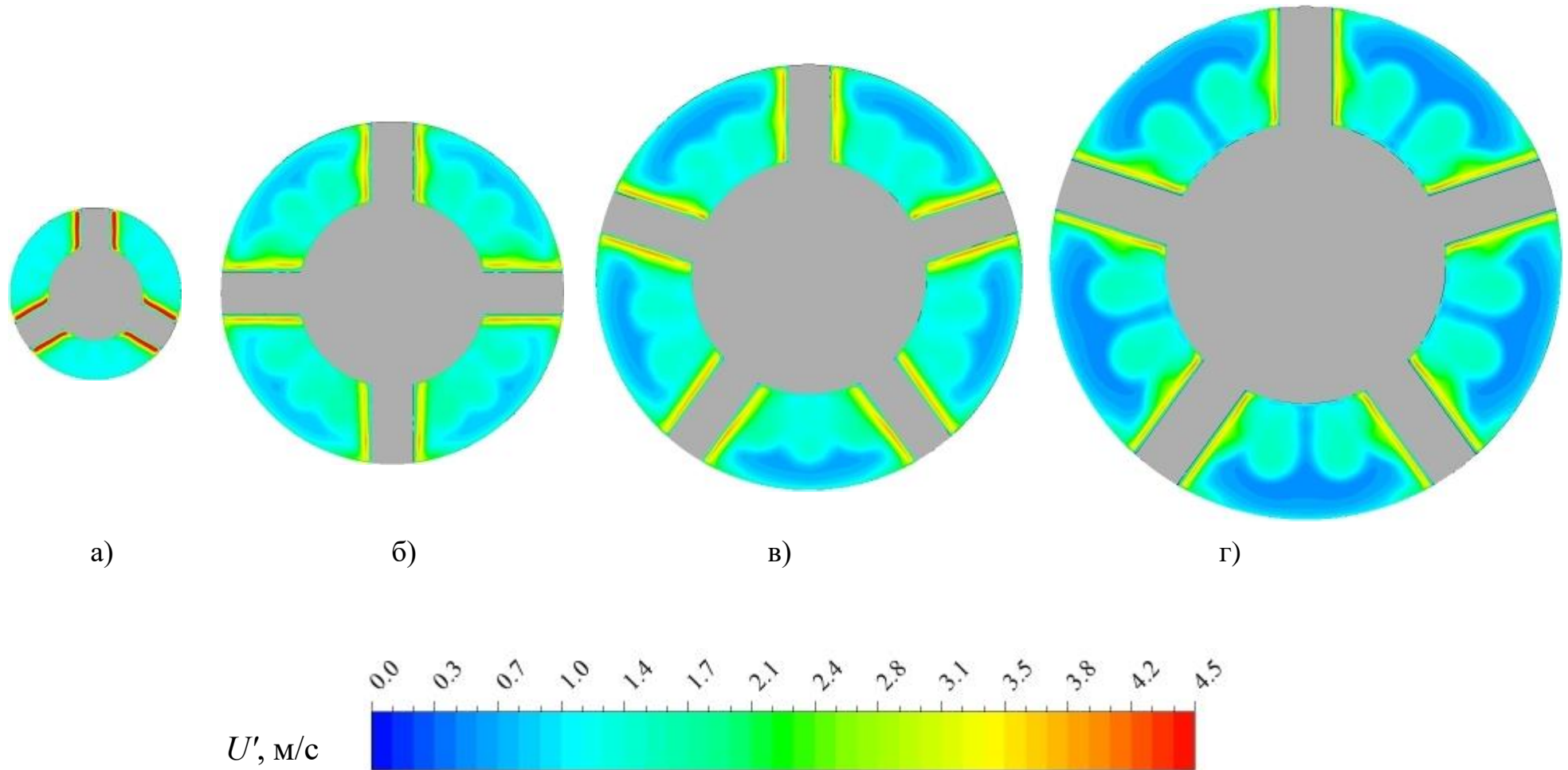


Рис. 5.11. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечному перерізі  $x = 0,25$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

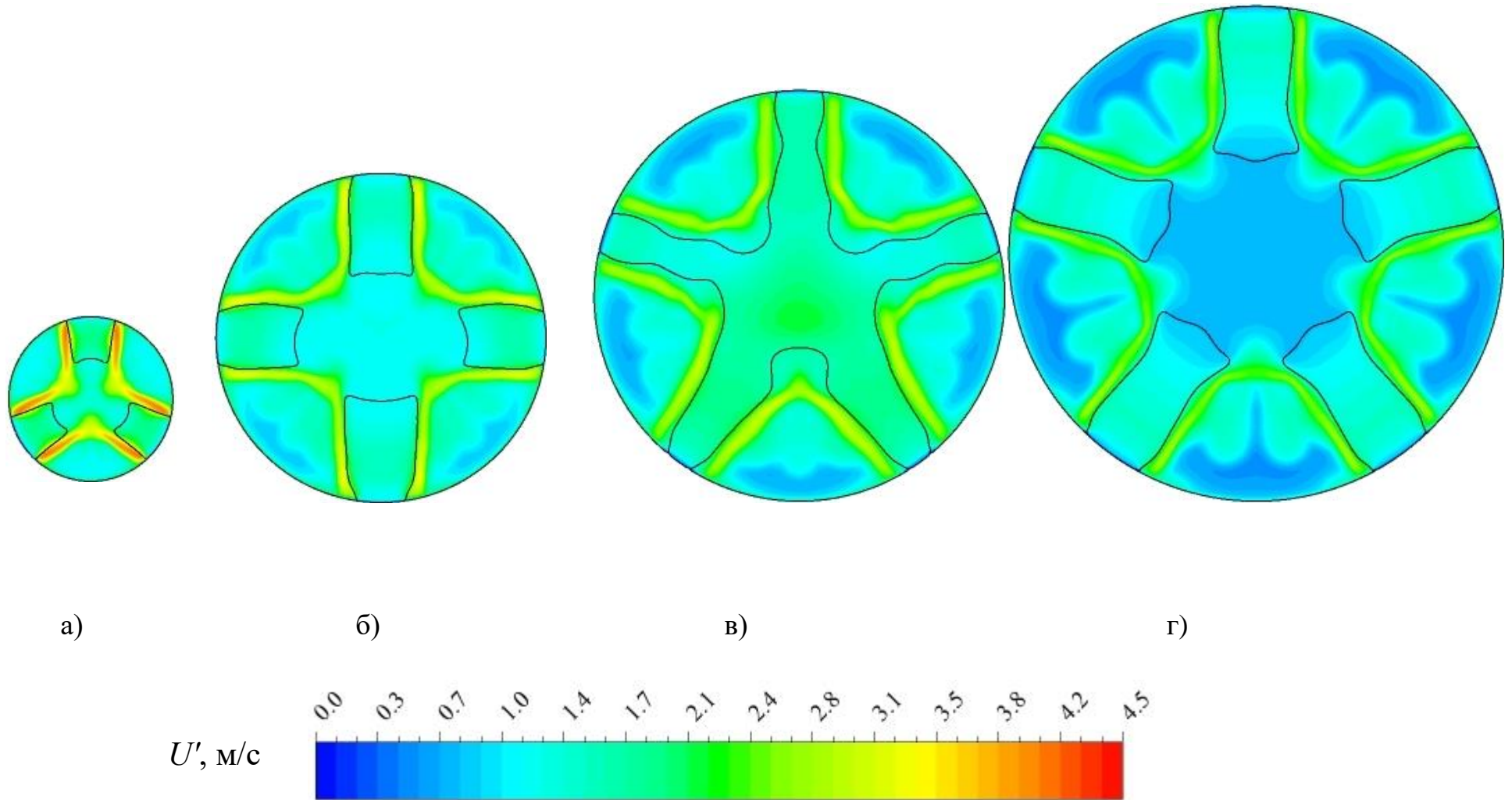


Рис. 5.12. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечному перерізі  $x = 0,26$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

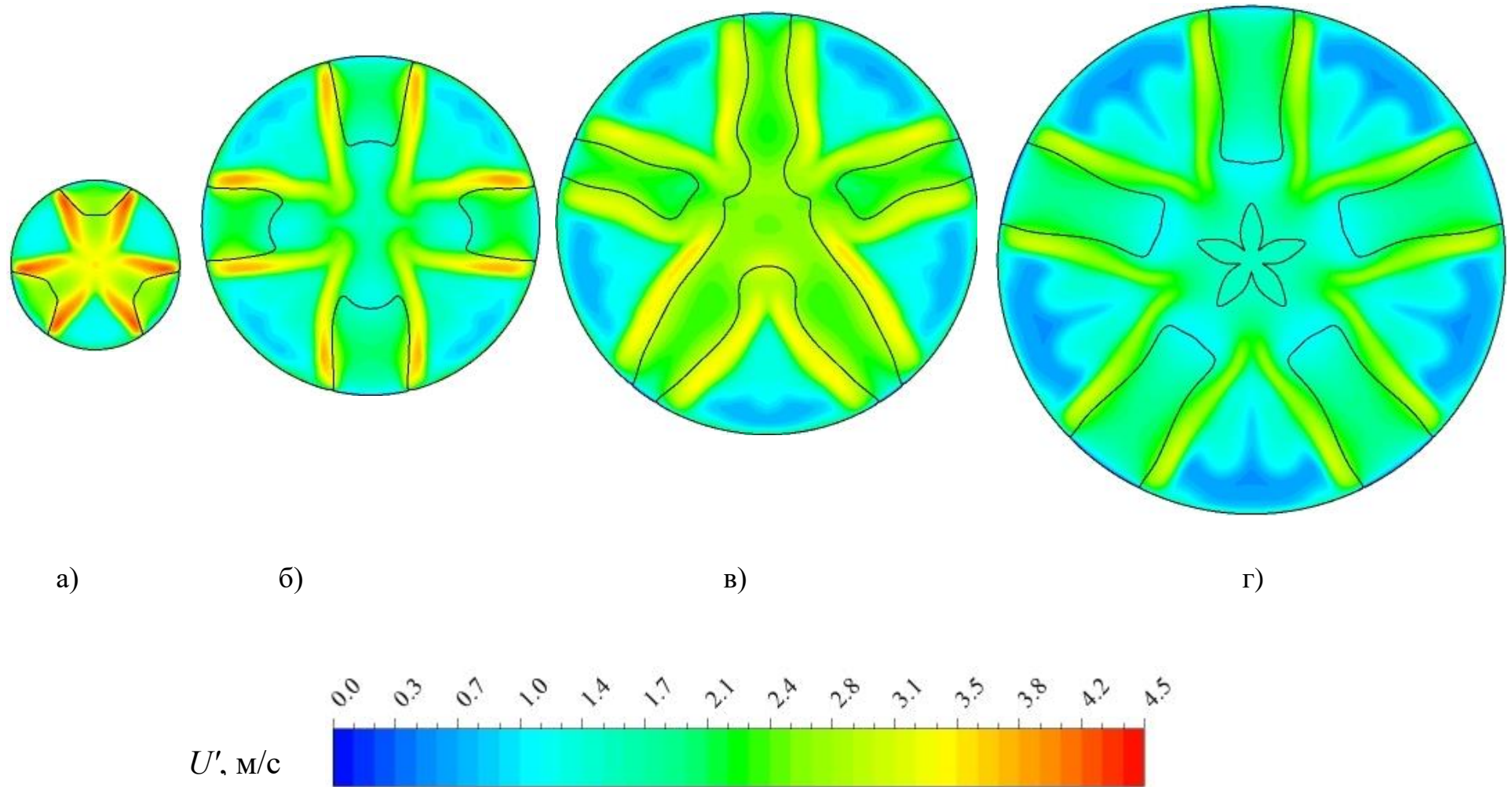


Рис. 5.13. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечному перерізі  $x = 0,275$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

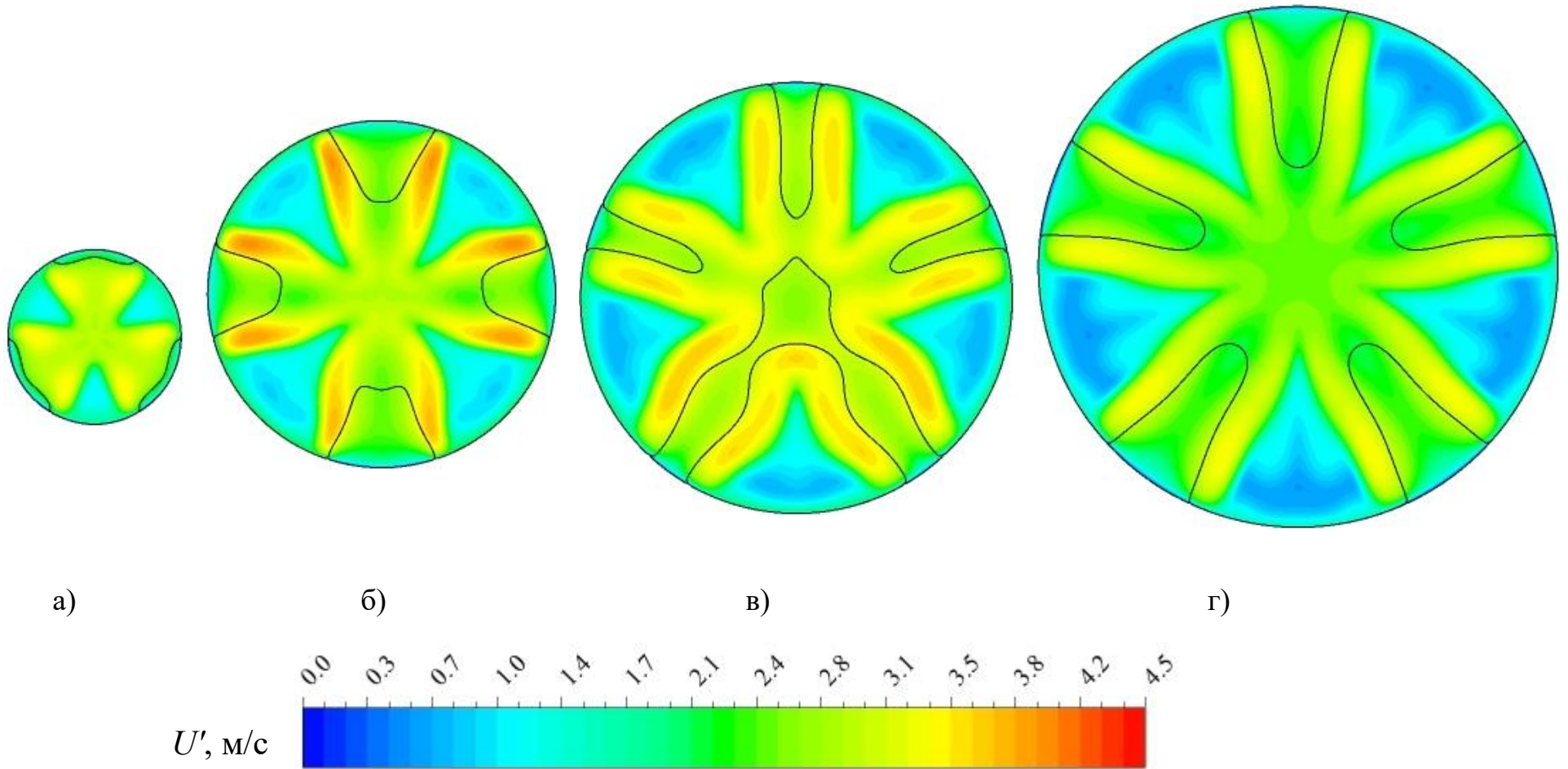


Рис. 5.14. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечному перерізі  $x = 0,3$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

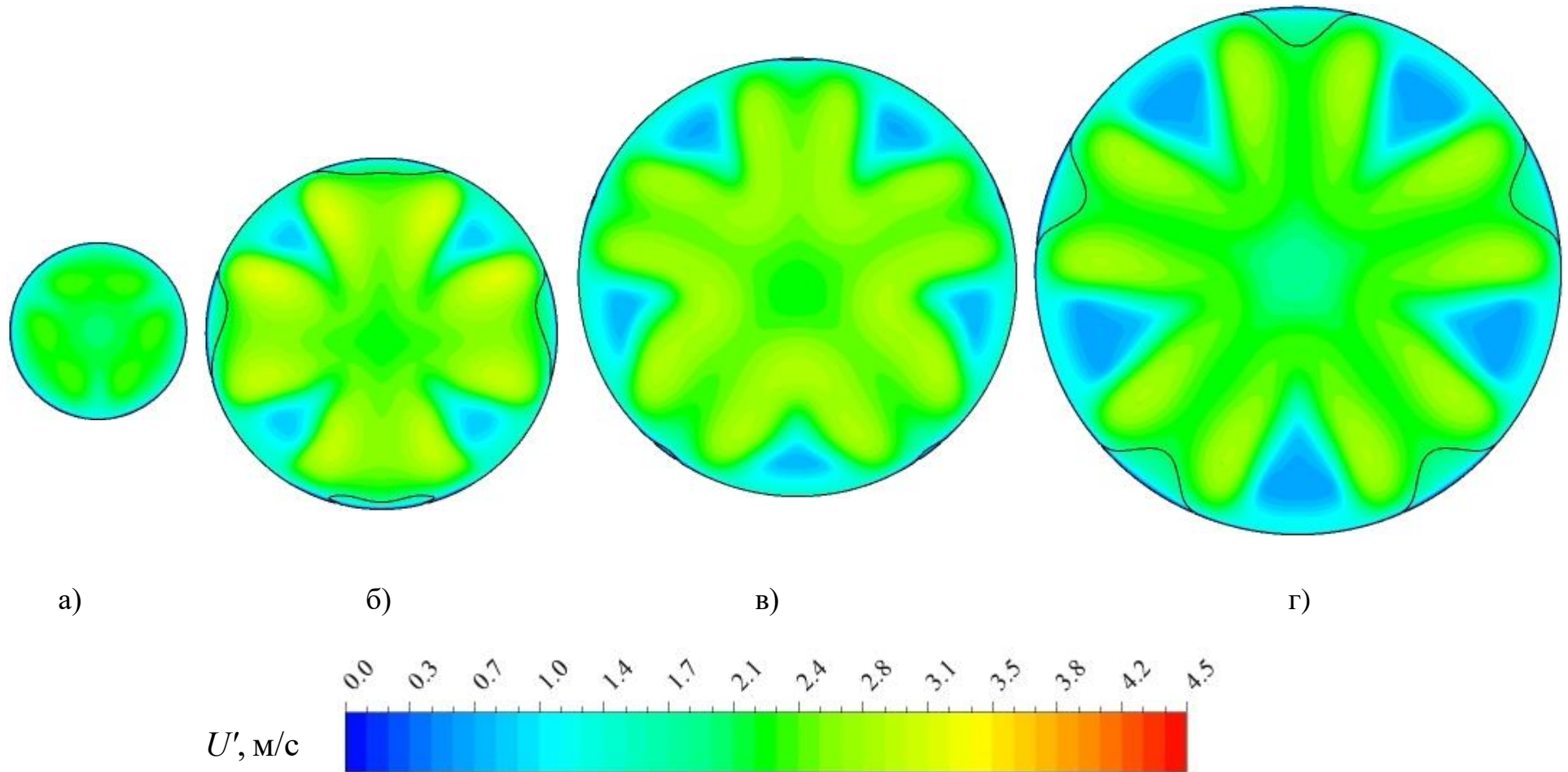


Рис. 5.15. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості  $U'$  в поперечному перерізі  $x = 0,35$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).



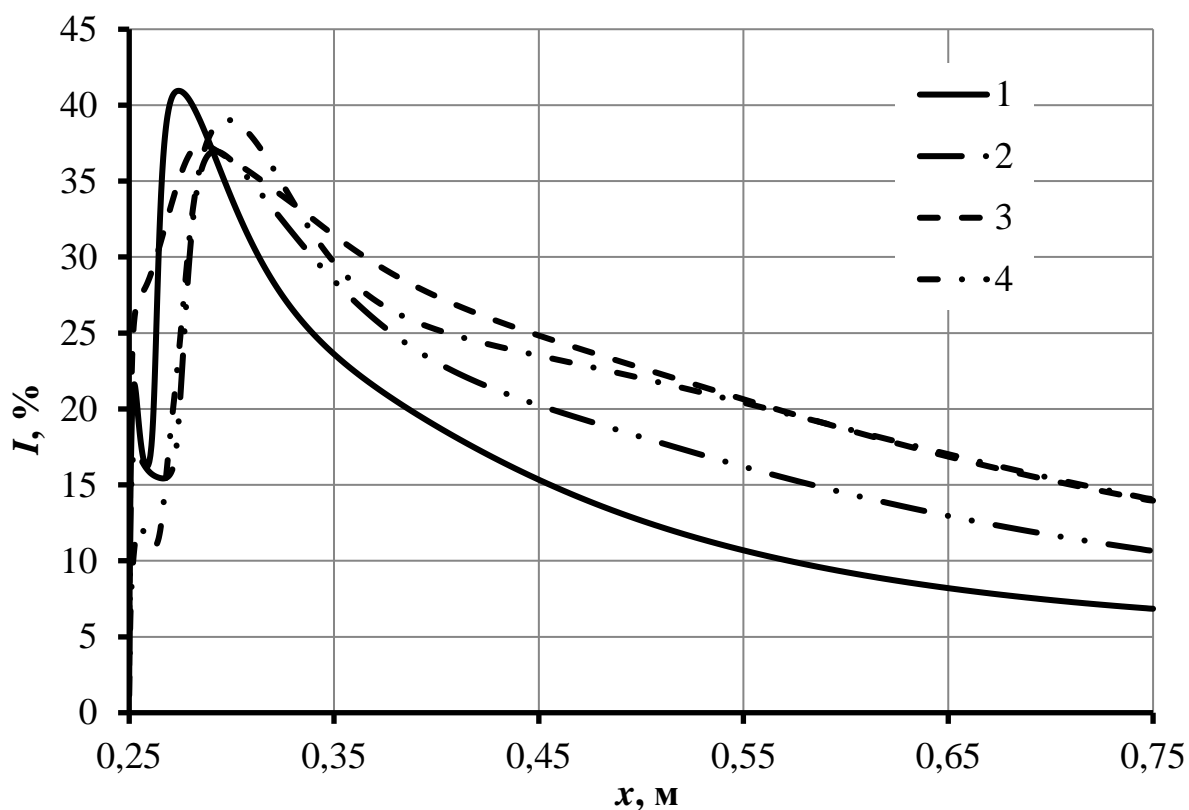


Рис. 5.16. Розподіл інтенсивності турбулентності вздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я з пластинчастими турбулізаторами потоку для пальників різної потужності: 1 –  $N_{\text{п}} = 30$  кВт; 2 –  $N_{\text{п}} = 110$  кВт; 3 –  $N_{\text{п}} = 155$  кВт; 4 –  $N_{\text{п}} = 200$  кВт.

Рис. 5.17 ілюструє дані про зміну інтенсивності турбулентності вздовж осі сліду за стабілізатором полум'я для розглянутого типоряду пальників за наявності та відсутності турбулізаторів потоку. Як видно, установка турбулізаторів потоку на зривний кромці стабілізатора полум'я може призводити до істотного підвищення інтенсивності турбулентності. Дане підвищення виявляється найбільш значним поблизу торця стабілізатора в зонах, що відповідають максимуму кривої  $I = f(x)$ . Так, воно сягає приблизно 12% для пальника потужністю 30 кВт, тобто через наявність турбулізатора інтенсивність турбулентності збільшується більш ніж на 40%.

Із віддаленням від торця стабілізатора полум'я вплив турбулізаторів на величину інтенсивності турбулентності зменшується. Причому найбільш швидко цей вплив зменшується для пальника найменшої потужності ( $N_{\text{п}} = 30$  кВт).

Наприклад, при  $x = 0,45$  м, тобто на відстані 0,2 м від торця стабілізатора полум'я, завдяки встановленню турбулізаторів інтенсивність турбулентності підвищується для пальників потужністю 155 кВт приблизно на 10%, а для пальника потужністю 30 кВт – лише на 5%.

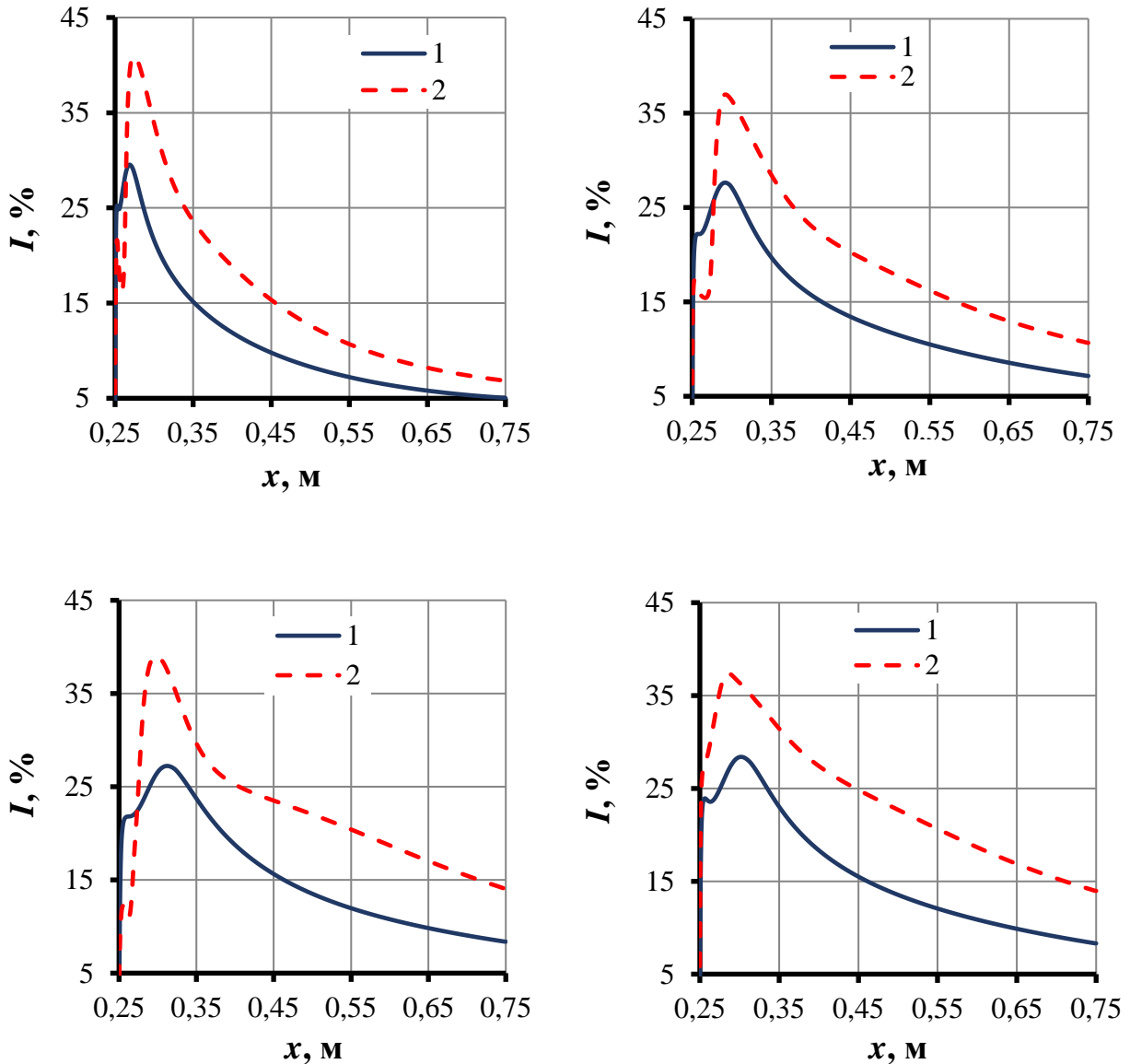


Рис. 5.17. Зміна інтенсивності турбулентності вздовж осі сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за наявності (2) і відсутності (1) турбулізаторів потоку для пальників різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

## 5.2. Закономірності сумішоутворення палива і окиснювача в досліджуваних пальникових пристроях

На рис. 5.18 - 5.24 представлено характерні результати комп'ютерного моделювання процесів сумішоутворення палива і окиснювача в пальниках з пластинчастими турбулізаторами потоку. Рис. 5.18, 5.19 ілюструють поля концентрацій метану для умов, що відповідають наявності і відсутності турбулізаторів потоку на зривних кромках стабілізаторів. Як видно, процес сумішоутворення протікає більш інтенсивно за умов, коли на зривній кромці стабілізатора встановлені пластинчасті турбулізатори потоку

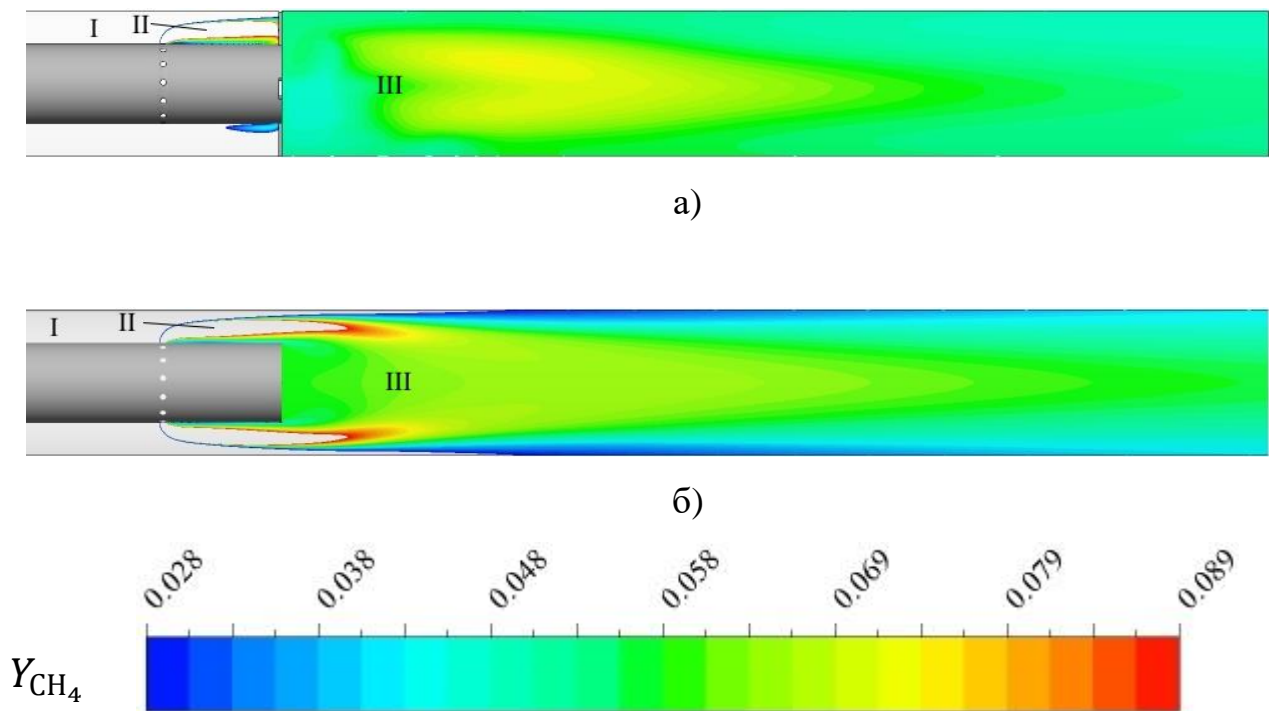


Рис. 5.18. Поля масової концентрації метану в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавальних отворів для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) і відсутності (б) пластинчастих турбулізаторів потоку.

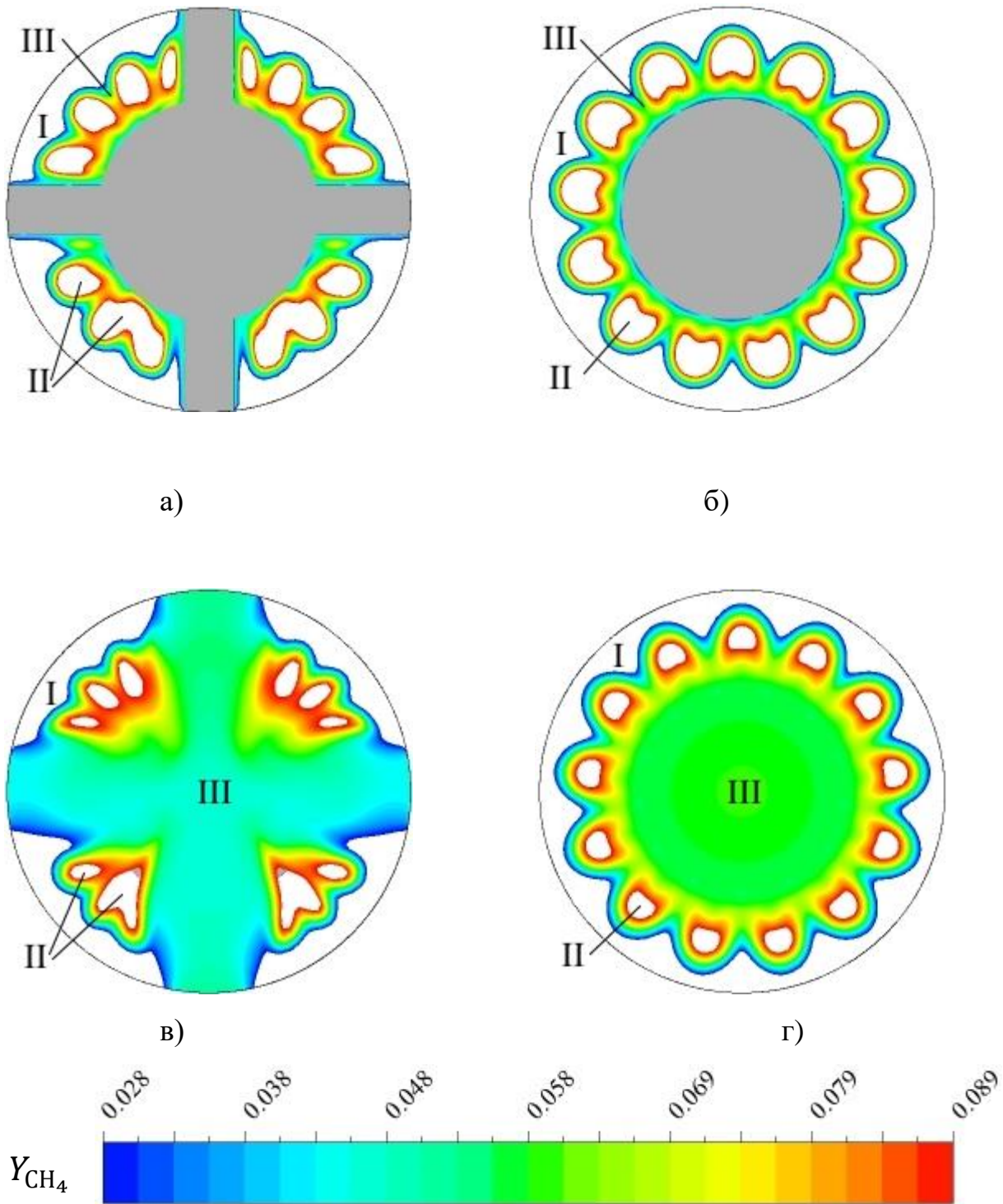


Рис. 5.19. Поля масової концентрації метану в поперечних перерізах  $x = 0,25$  м (а, б) і  $x = 0,27$  м (в, г) для пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а, в) і відсутності (б, г) пластинчастих турбулізаторів потоку.

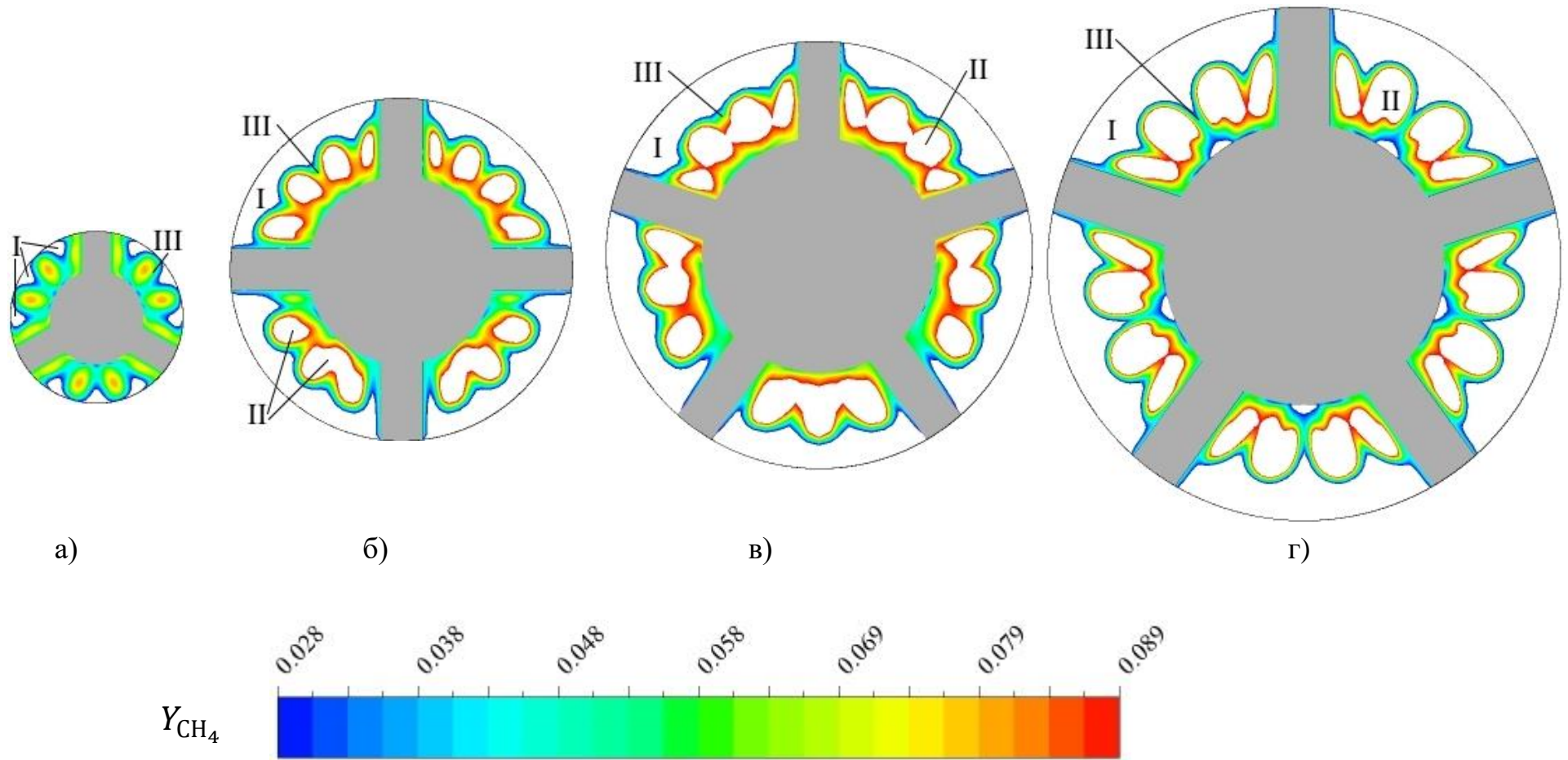


Рис.5.20. Поля масової концентрації метану в поперечних перерізах  $x=0,25$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

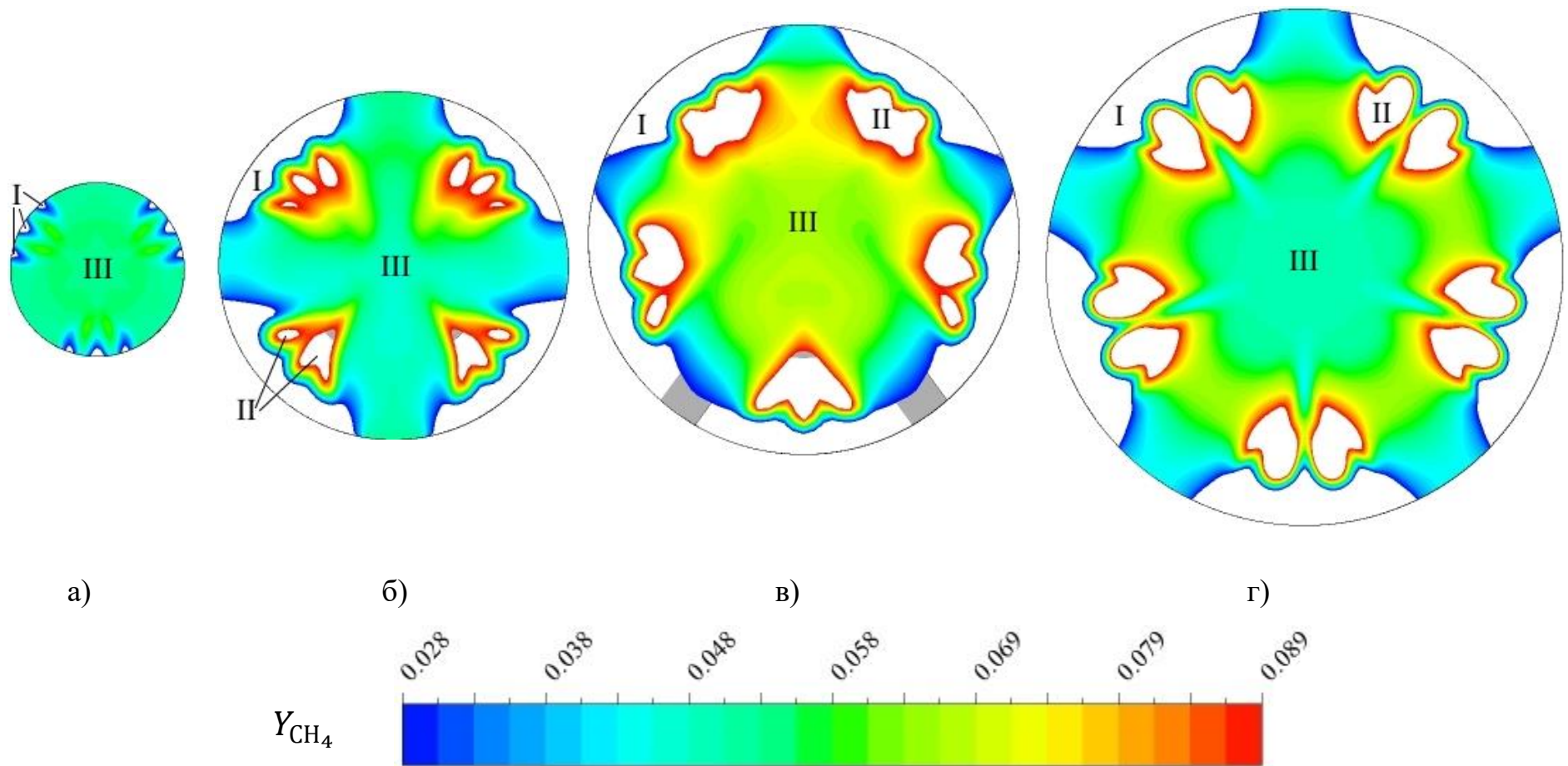


Рис.5.21 Поля масової концентрації метану в поперечних перерізах  $x = 0,275$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{п} = 30$  кВт (а);  $N_{п} = 110$  кВт (б);  $N_{п} = 155$  кВт (в);  $N_{п} = 200$  кВт (г).

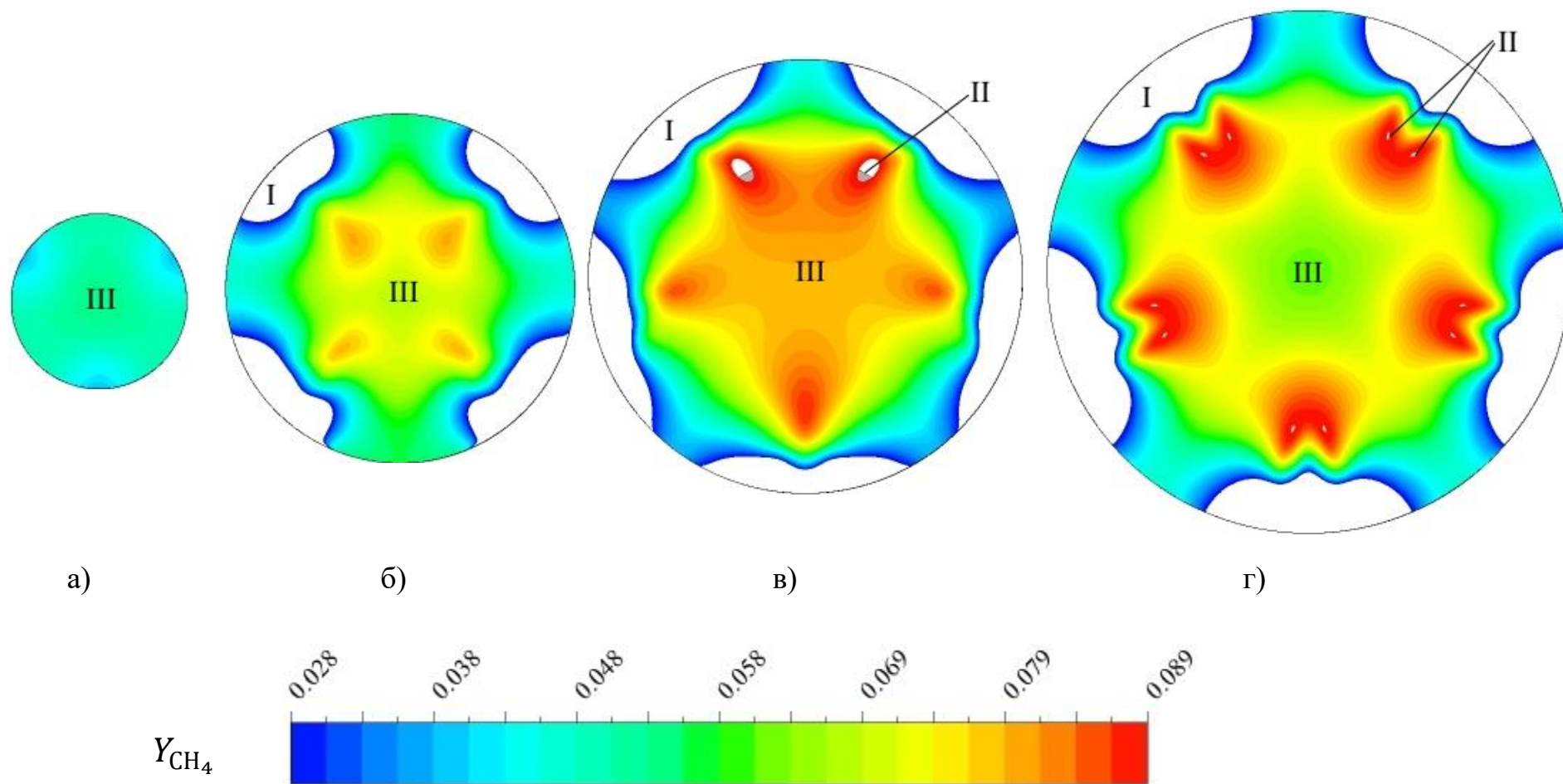


Рис.5.22. Поля масової концентрації метану в поперечних перерізах  $x=0,35$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{\text{п}} = 30$  кВт (а);  $N_{\text{п}} = 110$  кВт (б);  $N_{\text{п}} = 155$  кВт (в);  $N_{\text{п}} = 200$  кВт (г).

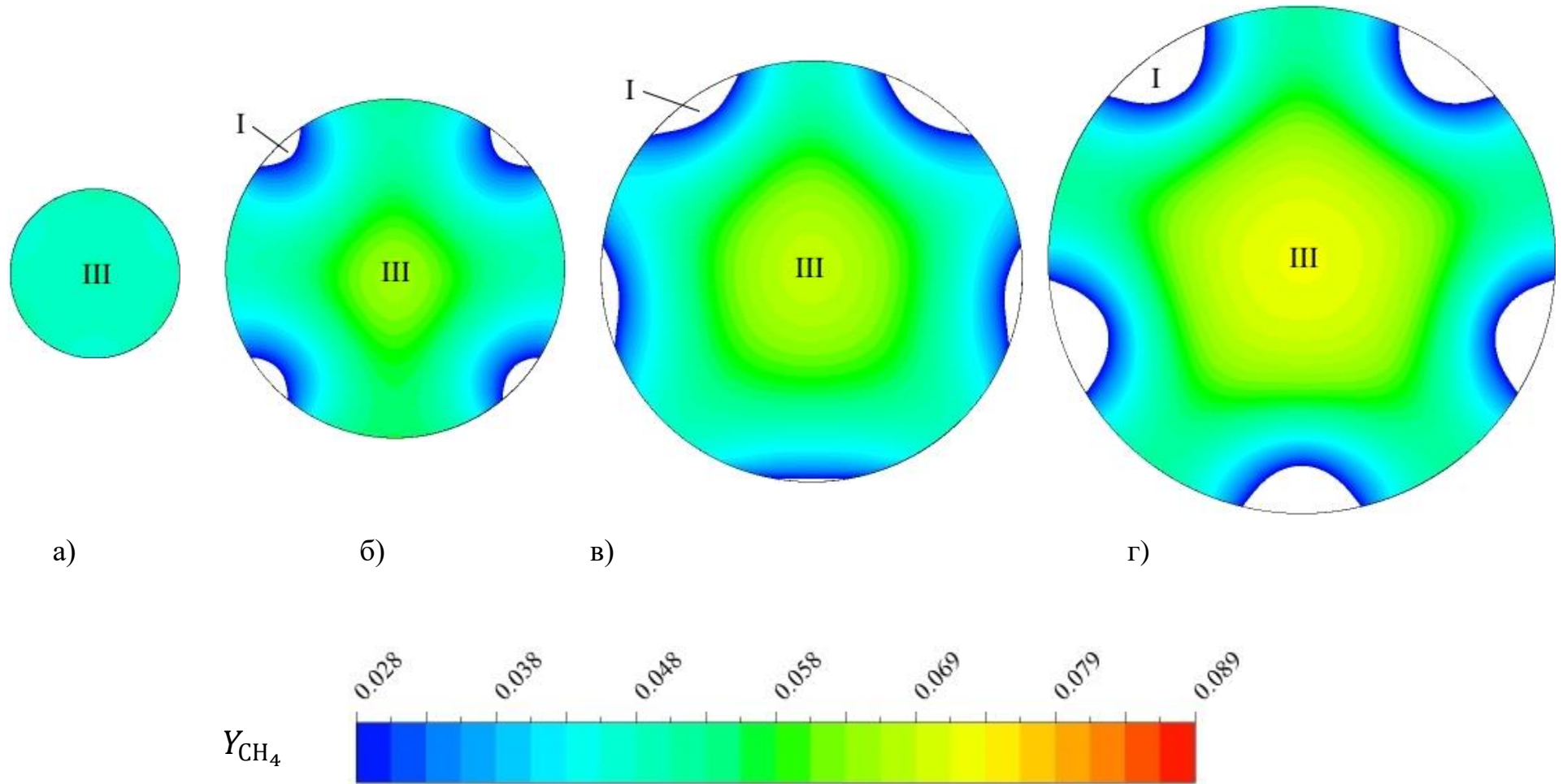


Рис.5.23. Поля масової концентрації метану в поперечних перерізах  $x = 0,5$  м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності:  $N_{п} = 30$  кВт (а);  $N_{п} = 110$  кВт (б);  $N_{п} = 155$  кВт (в);  $N_{п} = 200$  кВт (г).



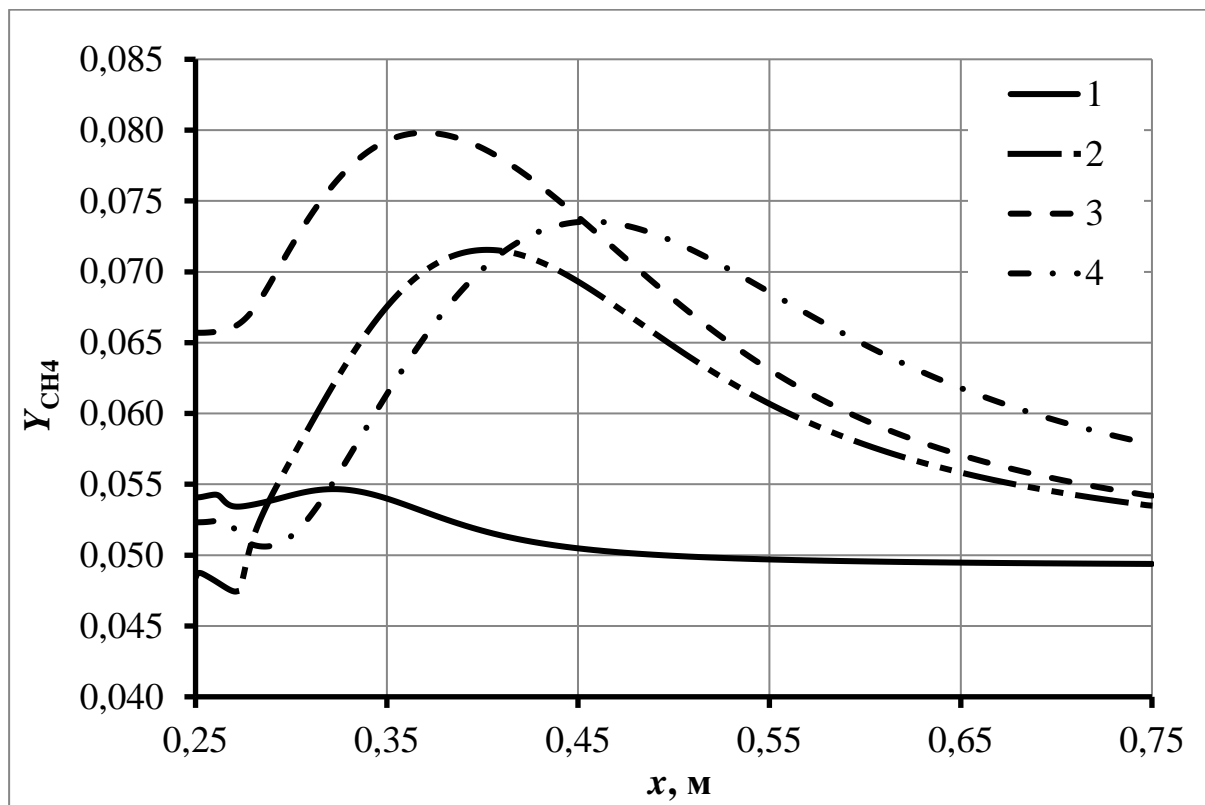


Рис. 5.24. Розподіл масової концентрації метану вздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я з пластинчастими турбулізаторами потоку для пальників різної потужності: 1 -  $N_{\text{п}}= 30$  кВт; 2 -  $N_{\text{п}}= 110$  кВт; 3 -  $N_{\text{п}}= 155$ кВт; 4 -  $N_{\text{п}}= 200$  кВт.

На рис. 5.20-5-24 наведено дані про характер сумішоутворення для пальників різної потужності з турбулізаторами потоку на їх зривних кромках.

Як впливає з представлених даних, з ростом потужності пальникового пристрою інтенсивність змішування палива і повітря знижується. Однак, у разі наявності турбулізаторів потоку це зниження не є настільки значним, як в пальниках без турбулізаторів.

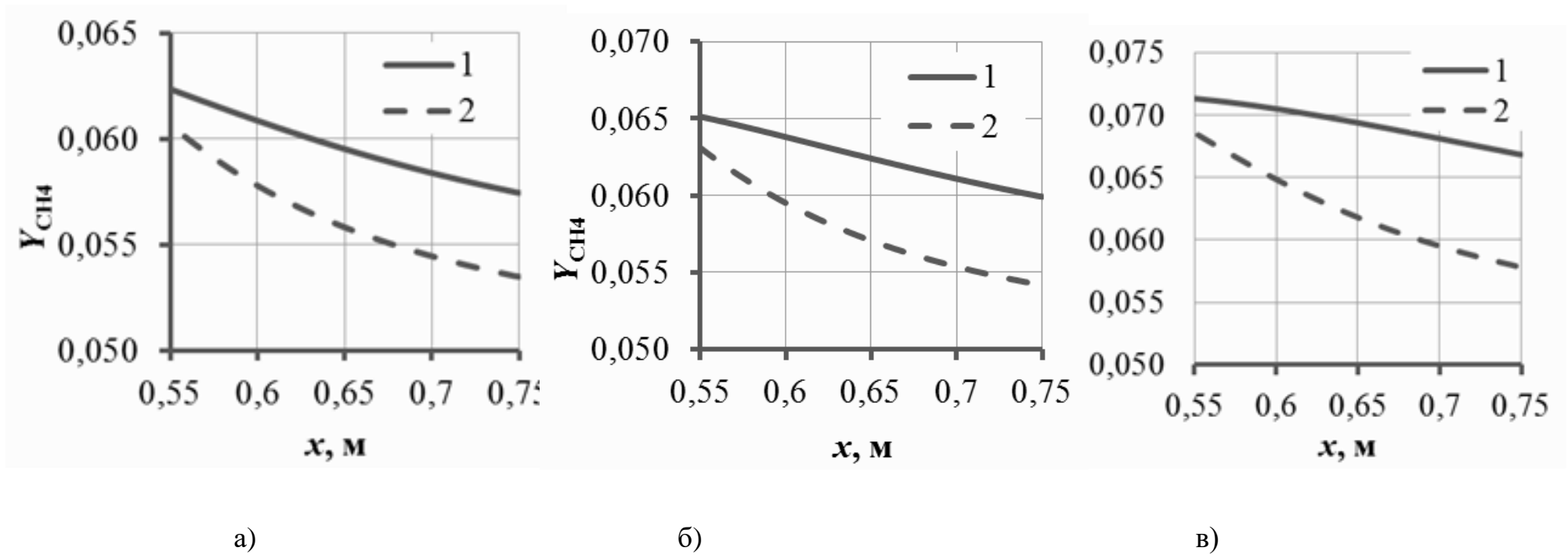


Рис. 5.25. Зміна масової частки метану вздовж осі сліду за стабілізатором на деякій відстані від нього для пальників потужністю 110 кВт (а), 155 кВт (б) и 200 кВт (в).

### 5.3. Температурні поля продуктів горіння і особливості вигорання палива у пальниках з турбулізаторами потоку

На рис. 5.26 - 5.29 наведено дані математичного моделювання, щодо теплового стану продуктів горіння для пальників з турбулізаторами потоку і без них.

Щодо особливостей процесу горіння за наявності та відсутності турбулізаторів потоку було встановлено, що в першому випадку через істотне збільшення периметра підпалювання горіння починається на значній частині перерізу, яка відповідає зривній кромці стабілізатора. За відсутності ж турбулізатора початок горіння відповідає лише площі торцевої поверхні стабілізатора. Дана обставина поряд з істотною турбулізацією потоку призводить до значного підвищення інтенсивності вигорання палива і помітного зниження нерівномірності поля температур в поперечних перерізах факела при встановленні турбулізаторів потоку на зривній кромці стабілізаторів полум'я.

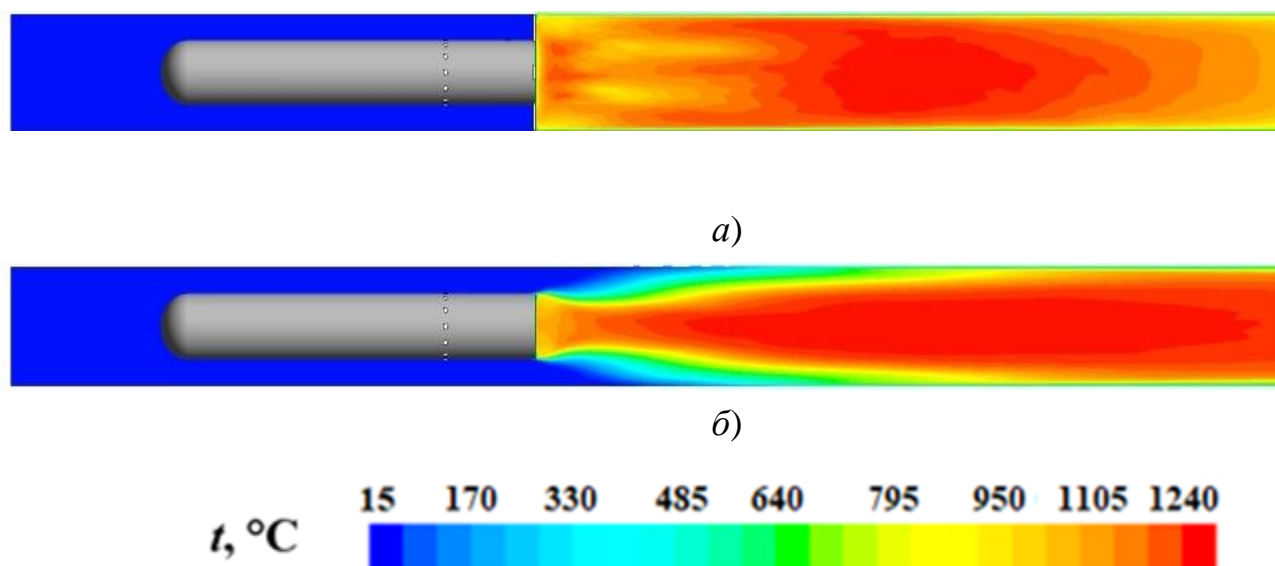


Рис. 5.26. Поля температур в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавальних отворів, за наявності (а) і відсутності (б) турбулізаторів потоку.

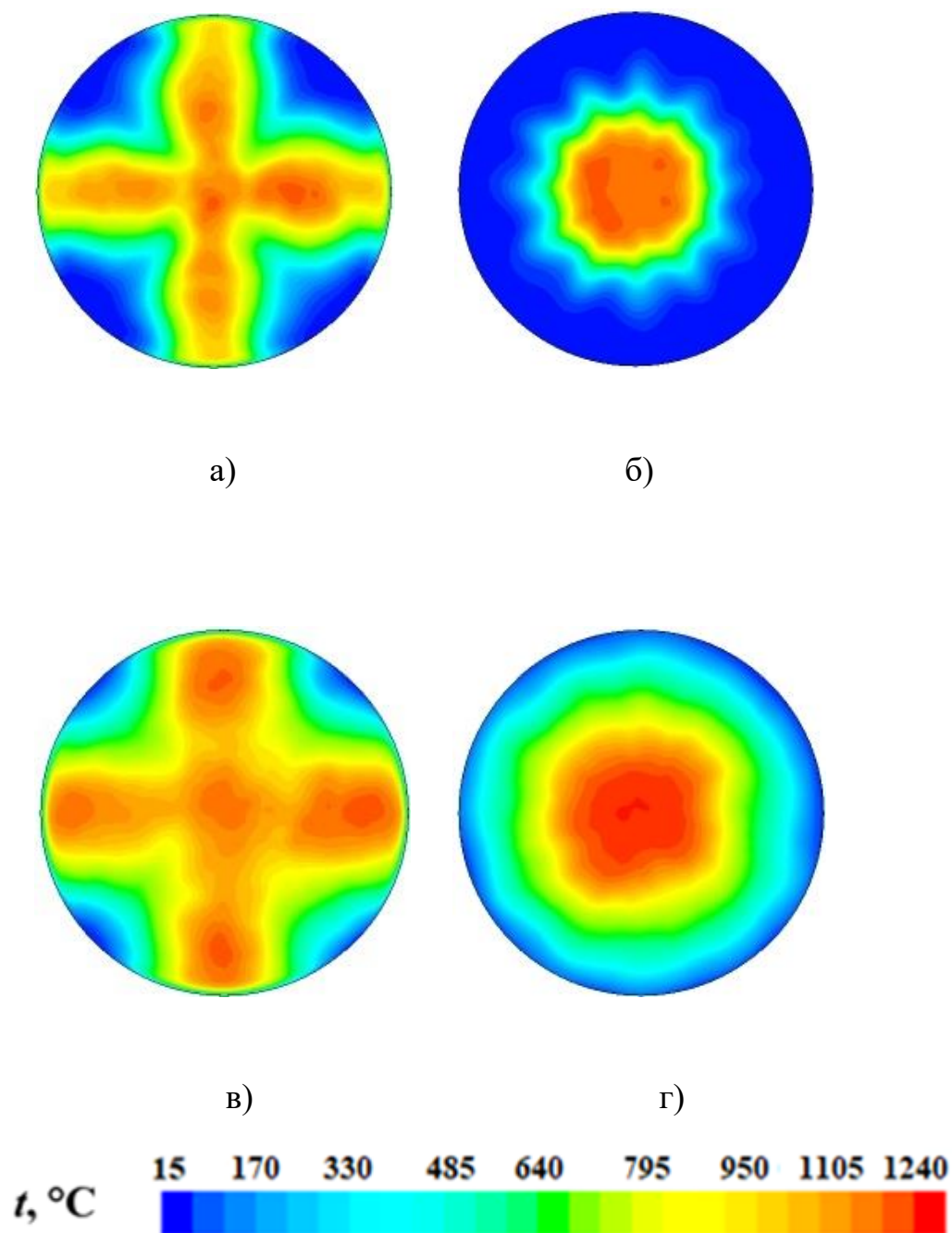


Рис. 5.27. Поля температур в поперечних перерізах  $x=0,28\text{м}$  (а, б) та  $x=0,35\text{ м}$  (в, г) для пального пристрою потужністю 90 кВт за наявності (а, в) та відсутності (б, г) турбулізаторів потоку.

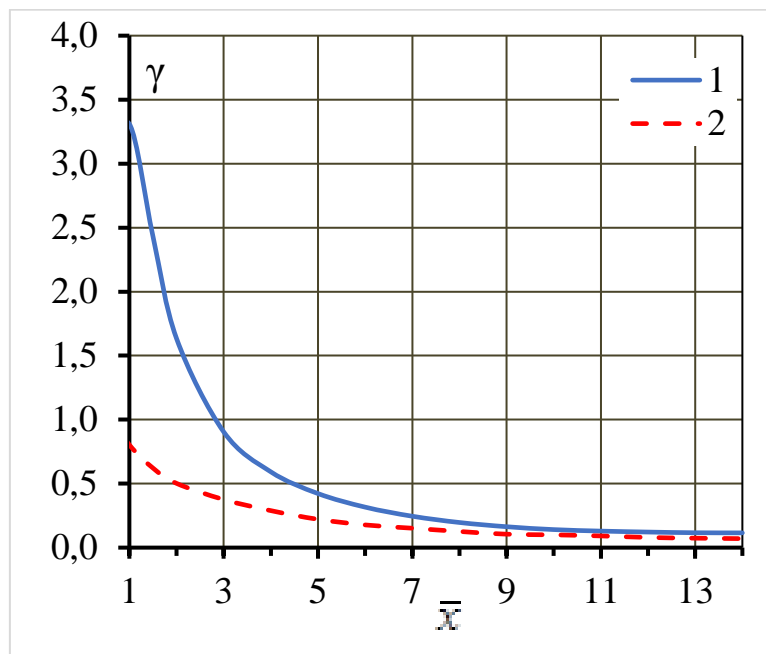


Рис. 5.28. Відносна нерівномірність поля температур  $\gamma$  у поперечних перерізах факела за відсутності (1) і наявності (2) турбулізаторів потоку

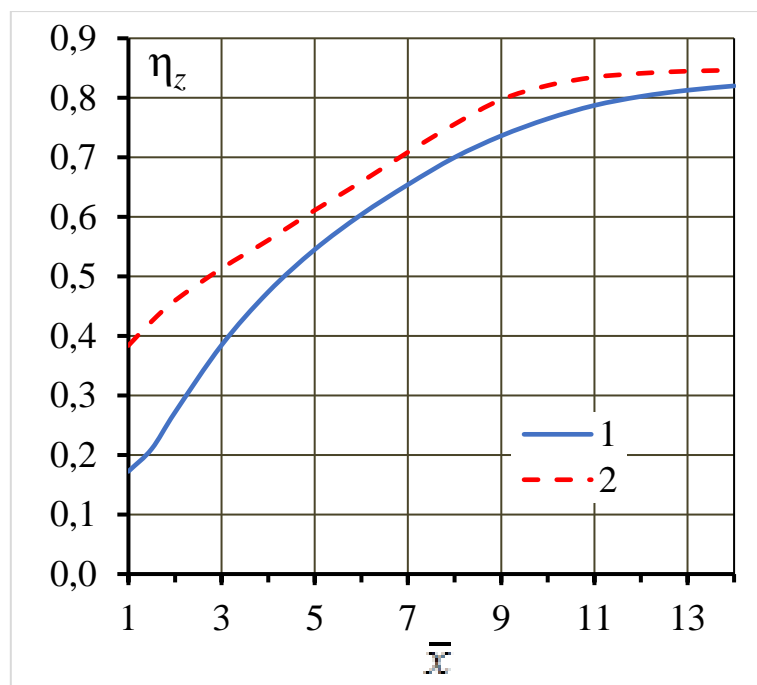


Рис. 5.29. Зміна коефіцієнта повноти згоряння палива для циліндричного пальника за відсутності (1) і наявності (2) турбулізаторів потоку

#### 5.4. Висновки за розділом

За результатами виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведено зіставлення характеристик течії і сумішоутворення палива й окиснювача для циліндричних пальникових пристроїв за наявності та відсутності турбулізаторів потоку на зривних кромках стабілізаторів.
2. Розглянуто особливості аеродинаміки та сумішоутворення для пальників з турбулізаторами потоку різної потужності.
3. Виконано порівняльний аналіз процесів формування температурних полів зони горіння і вигоряння палива для пальників з турбулізаторами потоку і без них.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено основні положення теплофізики спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності із застосуванням різних модифікацій циліндричних стабілізаторів полум'я – гладких, з кільцевими прямокутними нішами на бічних поверхнях стабілізаторів та з турбулізаторами потоку на їхніх зривних кромках.

2. Виконано порівняльний аналіз робочих процесів пальників з плоскими і гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. Встановлено, що форма стабілізатора полум'я спричиняє значний вплив на характеристики всіх елементів робочого процесу досліджуваних пальників. Показано, що у порівнюваних ситуаціях суттєво відрізняються параметри циркуляційних течій в закормових областях стабілізаторів. У пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я має місце підвищення рівня турбулізації потоку і відповідна інтенсифікація процесів сумішоутворення палива та окиснювача і вигорання палива. Так, для пальникового пристрою потужністю  $N_{\text{п}} = 90$  кВт: у 1,8 рази скорочується протяжність зони зворотних токів за стабілізатором; в 1,6 рази збільшується значення модуля максимальної швидкості в цій зоні; більш ніж на 20 % зростають максимальні величини інтенсивності турбулентності у ближньому сліді за стабілізатором; зменшуються втрати тиску за трактом окиснювача на 12,5 % тощо.

3. Для типоряду пальникових пристроїв з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю від 30 до 200 кВт виконано комплекс досліджень їх робочих процесів. При цьому:

а) за результатами досліджень визначено раціональні конструктивні і режимні параметри пальників. Встановлено наявність чіткої кореляції між потужністю пальника  $N_{\text{п}}$  і його геометричними характеристиками. А саме, зростанню потужності  $N_{\text{п}}$  з 30 до 200 кВт відповідає збільшення діаметру циліндричного стабілізатора полум'я від  $2,0 \cdot 10^{-2}$  м до  $6,0 \cdot 10^{-2}$  м, діаметру газоподавальних отворів – з  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м до  $4,0 \cdot 10^{-3}$  м і зменшенню відносного кроку їх розташування від 3,5 до 3,14;

б) на основі зіставлення закономірностей перебігу робочих процесів у пальниках різної потужності, зокрема, показано, що зі збільшенням потужності  $N_{\text{п}}$  спостерігається тенденція до підвищення рівня турбулізації потоку на деякій відстані від стабілізатора

полум'я та все більша частина процесу сумішоутворення палива і окиснювача виноситься за межі власне пальника у топковий простір;

в) досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані  $L_1^*$  між газоподавальними отворами і зривною кромкою стабілізатора полум'я. Показано, що для забезпечення у пальниках досліджуваного типоряду, так званого внутрішнього сумішоутворення (коли у перерізі, що відповідає зривній кромці стабілізатора, має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розміщувати на відстані  $L_1^*$ , що становить 0,07 м; 0,105 м; 0,1225 м і 0,14 м відповідно для пальників потужністю 30, 110, 155 і 200 кВт. Однак, практично однаковим для різних пальників типоряду і рівним приблизно 35 є відношення відстані  $L_1^*$  до діаметру газоподавальних отворів.

4. Виконано комплексні дослідження процесів переносу для модифікації типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних ніш на їх бічних поверхнях. В тому числі:

а) на основі CFD моделювання робочих процесів пальників цієї модифікації при варіюванні в певних межах їхніх основних геометричних характеристик (розмірів нішової порожнини, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора полум'я, відстані між газоподавальними отворами тощо) здійснено вибір конструктивних параметрів даних пальникових пристроїв. Зокрема, визначено необхідні розміри нішових порожнин, виходячи з умови, згідно з якою первинний вихор у ніші повинен займати основну частину її простору для ефективного сумішоутворення і стабілізації полум'я в ніші. Показано, що відносна довжина кільцевої ніші  $\bar{L}$  має становити 3,0; 3,5; 3,75 і 4,0 відповідно для пальників потужністю 30; 110; 155 і 200 кВт;

б) встановлено закономірності впливу нішових порожнин на робочі процеси пальників пропонованого типоряду. Показано, що за наявності нішових порожнин на бічних поверхнях стабілізаторів полум'я відбувається суттєве (до двох разів) підвищення інтенсивності турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізаторів полум'я, помітне прискорення процесу сумішоутворення палива і окиснювача, більш ранній за течією початок горіння, вища інтенсивність вигорання палива і менший ступінь нерівномірності температурних полів у поперечних перерізах факелу. Встановлено, що пальники з кільцевими нішами характеризуються покращеними стабілізаційними властивостями. Так, значення коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha_{max}$  на бідному зриві збільшується на 16% при потужності пальникового пристрою 30 кВт і на 24 % при потужності 200 кВт. Показано



також, що втрати тиску в пальниках, пов'язані з наявністю кільцевих ніш, є порівняно незначними і не перевищують 13%.

5. Для модифікації типоряду пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я та пластинчастими турбулізаторами потоку на їхніх зривних кромках досліджено закономірності аеродинаміки, сумішоутворення, вигорання палива і формування температурних полів в зоні горіння. За результатами виконаних досліджень, зокрема, показано, що встановлення турбулізаторів призводить до суттєвої зміни структури течії та інтенсифікації всіх елементів робочого процесу пальників. Так, для пальникових пристроїв досліджуваного типоряду потужністю від 30 до 200 кВт, оснащених турбулізаторами різних розмірів, за кожним з них утворюється зона рециркуляції, протяжність якої суттєво перевищує відповідно протяжність такої зони за відсутності турбулізаторів потоку. До прикладу, для пальника потужністю 110 кВт з чотирма турбулізаторами потоку на зривній кромці стабілізатора полум'я протяжність вказаної зони рециркуляції становить 0,116 м, а для такої зони за відсутності турбулізаторів – лише 0,0475 м. Показано, що ефект зниження впливу турбулізаторів з віддаленням від стабілізатора полум'я вниз за потоком є суттєвішим для пальників меншої потужності. Встановлено також, що втрати тиску в пальниковому пристрої, зумовлені наявністю турбулізаторів, є відносно незначними за величиною в усьому діапазоні зміни потужності пальникових пристроїв.

6. На основі виконаного комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо умов застосування різних модифікацій типоряду пальникових пристроїв, орієнтованих на використання у вогнетехнічних об'єктах невеликої потужності. Результати досліджень впроваджено в НВК «Струменево-нішова технологія» на сушарках фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу НІСТУ, Е-1,0-0,9ГН-2 тощо.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Любчик Г.М. Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих модулів / Г.М. Любчик, Г.С. Марченко, Г.Б. Варламов та ін. // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2004. – №1. – С.73 – 79.
2. Любчик Г.Н.. Структура зоны смешения и характеристики дальнобойности диффузионных факелов в топливосжигающих элементах с поперечной подачей топлива в зону обратных токов/Г.Н. Любчик // В сб. Структура газофазных пламен. Часть I. - Новосибирск: СО АН СССР, 1988.– С. 157 – 173.
3. Аль-Зуби . Характеристики дальнобойности и структура диффузионного факела в струйном топливосжигающем элементе постоянной ширины / Аль-Зуби и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение.– 1998. - №2.– С. 50 – 55.
4. Любчик Г. Н. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, Г. А. Микулин, С. А. Левчук, А. А. Зарицкий, Н. Н. Ольховская// Технологические системы.– 2002.– № 1.– С. 130-133.
5. Мікулін Г.О. Використання трубчастих модулів як елементів інтенсифікації горіння та підвищення енергоекологічної ефективності газових пальників / Г.О. Мікулін, Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов та ін. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – №4. – С. 58 – 65.
6. Реграги А. Структура и особенности развития факела в трубчатом топливосжигающем модуле / А. Реграги, Г.Н. Любчик, А.А. Зарицкий // Энергетика: економіка, технології, екологія.– 2007.– №2.– С. 97 – 105.
7. Варламов Г. Б. Новое поколение горелочных систем ГТУ на основе трубчатой технологии сжигания газа / Г. Б. Варламов, А. А. Халатов, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2012.- Т. 3, №10 (57). –С. 9-14.
8. Говдяк Р. М. Перспективы повышения надежности, экологической безопасности и энергетической эффективности ГПА на основе применения

- трубчатой технологии сжигания газа/ Р.М. Говдяк, Б. И. Шелковский, Л. Б. Чабанович, О. Г. Гриник, Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов// Ин-т электродинамики Национальной академии наук Украины. Специальный выпуск. – К: Институт электродинамики НАН Украины, 2006.-С.54-57.
9. Любчик Г. Н. Новая технология создания и использования эффективных и высокоэкологичных горелочных устройств для энергетических котлов и камер сгорания ГТУ и ПГУ / Г.Н. Любчик, Г.Б. Варламов// Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: проблемы и возможности [Под редакцией Вороновского Г. К., Недина И. В.]. - К.: Знания Украины, 2004. – С.115-121.
  10. Варламов Г. Б. Трубчаста технологія газоспалювання – прорив у енергозбереженні та екологічності транспортування природного газу / Г. Б. Варламов, Я. С. Марчук, М. В. Беккер, Г. М. Любчик, Ю. М. Камаєв, П. О. Позняков, Д. О. Кузьменко// Нафтова і газова енергетика. – 2010. – Т.12,№1 - С. 60-63.
  11. Варламов Г. Б. Особенности горелочной системы трубчатого типа для камеры сгорания ГТУ в составе ГТК-10 / Г. Б. Варламов, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2012. - .№2. – С.58-65.
  12. Любчик Г. Н. Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низкоэмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей / Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, В. В. Романов, В. Г. Ванцовский, В. В. Вилкул // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Современные технологии в газотурбостроении. Часть III. – 2009. – Т.40,№ 4/6.– С.13-18.
  13. Варламов Г. Б. Модернизация горелочной системы газотурбинного двигателя ДН80 с использованием трубчатой технологии газосжигания/ Г. Б. Варламов, Ю. М. Камаєв, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях.- Харків: НТУ «ХПІ». -2012.– №18. - С. 117-126.

14. Любчик Г.Н. Особенности эмиссии NOx и CO в горелках на базе трубчатых модулей / Г.Н. Любчик, С.А. Левчук, Г.Б. Варламов, Г.С. Марченко, Г.А. Микулин // Энергетика: економіка, технології, екологія.–2001.– № 4.–С. 59-63.
15. Любчик Г.Н. Повышение энергетической эффективности и экологической безопасности ГПА ГТК-10 НЗЛ на основе применения трубчатой технологии сжигания газа / Г.Н. Любчик, Р.М. Говдяк, Л.Б. Чабанович, Б.И. Шелковский, М.В. Беккер, Н.Е. Сакун //Газовая промышленность.– 2008. – № 7. –С. 86–89.
16. Любчик Г.Н. Особливості горіння дифузійного газового факела в одиночному трубчастому паливоспалювальному модулі / Г.Н. Любчик, Н.М. Фиалко, А. Реграги, М.В. Майсон // Вісник НУ «Львівська політехніка», Теорія і практика будівництва. – 2013. – № 755. – С. 242-248.
17. Микулин Г. А. Эмиссионные свойства трубчатых топливосжигающих элементов интенсификации горения и стабилизации пламени / Г. А. Микулин, Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов // Экотехнологии и ресурсосбережение.- 2005. - № 2.- С. 56 - 62.
18. Любчик Г. Н., Микулин Г. А., Варламов Г. Б., Марченко Г. С. Использование трубчатой технологии сжигания топлива в аппаратах и системах децентрализованного теплоснабжения / Г. Н. Любчик, Г. А. Микулин, Г. Б. Варламов, Г. С. Марченко /// В кн. «Малая энергетика в системе обеспечения экономической безопасности государства» [Под общей ред. Вороновского Г. К., Недина И. В.].-К.: Знання України, 2006. - С.139-151.
19. Любчик Г.Н. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок/ Г.Н.Любчик, Л.Б. Чабанович,Р.М. Говдяк и др.[Под общ. ред. Г.Н. Любчика и Л.Б. Чабановича].– К. : Варта, 2008. –188 с.
20. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М.Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
21. Сударев А.В. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения / А.В.Сударев, В.А.Маев. - Л.: Недра, 1990. – 274 с.
22. Грановская Е.А. Интенсификация процесса горения за стабилизатором подачи воздуха в зону рециркуляции / А.И. Повshedна, О.О. Грановська //

- Тези докл. XI міжнародної науково-технічної конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні технології в тепловій енергетиці», 16 – 19 квітня 2013 р, Київ. - НТУУ «КПІ». – С. 98..
23. Бутовський, Л. С. Експериментальні дослідження структури течії у пальникових пристроях стабілізаторного типу з застосуванням кутових турбулізаторів потоку/ Л. С. Бутовський, Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов та ін. // Матер. XXII межд. конф. «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта, 8-12 июня 2012 г. – Киев, 2012. – С. 141–145.
  24. Фіалко Н.М. Дослідження характеристик течії в системі плоских стабілізаторів полум'я з пластинчастими турбулізаторами потоку / Н.М. Фіалко, С.А. Альошко, К.В. Рокитько та ін. // Матер. XXI межд. конф. «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта, 7-11 июня 2011 г. - Киев, 2011. - С. 175-177.
  25. Фіалко Н.М. Особливості структури течії в решітці стабілізаторів полум'я з полум'яперекидними перемичками / Н.М. Фіалко, С.А. Альошко, М. В. Майсон та ін. // Матер. XXI межд. конф. «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта 7-11 июня 2011 г. - Киев, 2011. - С. 183-187.
  26. Фіалко Н.М. Вплив відстані між пластинчастим турбулізатором потоку і газоподавальними отворами на картину течії в стабілізаторному пальниковому пристрої / Н.М. Фіалко, С.А. Альошко, К.В. Рокитько та ін. // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXII межд. конференции, Ялта 8-12 июня 2012 г. - Киев, 2012. - С. 165-168.
  27. Фіалко Н.М. Аеродинаміка та сумішеутворювання палива і окисника в стабілізаторних пальникових пристроях з кутовими відкритими інтенсифікаторами горіння / Н.М. Фіалко, С.А. Альошко, М. В. Майсон та ін. // Матер. XXII межд. конф. «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта 8-12 июня 2012 г. - Киев, 2012. - С. 145-148.
  28. Фіалко Н.М. Математичне моделювання процесів переносу в мікрофакельних пальниках при застосуванні зрізаних інтенсифікаторів горіння / Фіалко Н.М., Альошко С.А., Майсон М. В. та ін. // Матер. XXII межд. конф. «Проблемы

- экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта 8-12 июня 2012 г. - Киев, 2012. - С. 153-156.
29. Фіалко Н.М. Математичне моделювання течії та сумішоутворення в стабілізаторних пальникових пристроях з кутовими відкритими інтенсифікаторами горіння / Н.М. Фіалко, Н.П. Полозенко, М.В. Майсон // 9-я Международная научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития». - Алушта, 19-23 сентября 2013 г. - 2013. - С. 88-90.
30. Прокопов В.Г. Математическое моделирование сжигания топлива в микрофакельных горелочных устройствах с интенсификаторами процессов горения / В.Г.Прокопов, Н.М.Фіалко, Ю.В.Шеренковский, С.А. Алешко, Н.О. Меранова, Н.В. Майсон и др. // VIII Международная конференция «Проблемы промышленной теплотехники», Киев, 8-11 октября 2013 г.. - №12. <http://ittf.kiev.ua/ru>.
31. Мікулін Г.О. Використання трубчастих модулів як елементів інтенсифікації горіння та підвищення енерго-екологічної ефективності газових пальників / Г.О. Мікулін, Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов та ін. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. - № 4. - С. 58-65.
32. Микулин Г.А. Аэродинамические характеристики и массообменные свойства трубчатых интенсификаторов горения и стабилизаторов пламени / Г.А. Микулин, Г.Н. Любчик // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2004. - Т. 15, № 2. - С. 54 - 62.
33. Христич В.А. Аэродинамика течения и особенности смесеобразования при диффузионном горении в нишевом стабилизаторе пламени / В.А. Христич, М.З. Абдулин, Ю.А. Кулешов // Рациональное использование топлива. – Л.: Недра, 1985. - С. 72-74.
34. Абдулин М.З. Струйно-нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени: Автореферат дис. к.т.н./ М.З. Абдулин - Киев, КПИ, 1986. - 16 с.
35. Прокопов В.Г. Влияние взаимного расположения нишевой полости и газоподающих отверстий на закономерности течения и смесеобразования

- топлива и окислителя / В.Г. Прокопов, С.А. Алешко, Ю.В. Шеренковский и др. // Материалы XIX межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта, 8-12 июня 2009г.- Киев, 2009.- С.175-177.
36. Фиалко Н.М. Численные исследования картины течения горючего и окислителя в горелочных устройствах струйно-нишевого типа / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, С.А. Алешко и др. // Материалы XVIII международной конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта, 10-14 июня 2008.- Киев, 2008.- С.101-104
37. Фиалко Н.М. Особенности структуры течения топлива и окислителя в стабилизаторных горелочных устройствах при различном расположении газоподающих отверстий относительно срывной кромки стабилизатора / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский и др. // Материалы XX международной конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта, 8–12 июня 2010. – Киев, 2010. – С.202–205.
38. Клищ А.В. Математическое моделирование смесеобразования в стабилизаторных горелочных устройствах при различном расположении газоподающих отверстий относительно срывной кромки стабилизатора / А.В. Клищ, Н.М. Фиалко, Н.О. Меранова// Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: IX міжнар. науково-практична конф. аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, 18–22 квітня 2011р.: тези доповідей. – Київ, 2011. – С.148.
39. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulations / P. R. Spalart // International Journal of Heat and Fluid Flow. - 2000. - Vol. 21, № 3. – P. 252–263.
40. Spalart P. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows./ P. Spalart, S. Allmaras //Technical Report AIAA-92-0439. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
41. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models Of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. - London, England: Academic Press, 1972.

42. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
43. Снегирев А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие / А.Ю. Снегирев – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
44. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев.– СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. - 108 с.
45. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
46. Wilcox D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows/ D.C. Wilcox //AIAA Journal. – 1988. -V. 26, № 11. -P. 1311-1320.
47. Menter F.R. Zonal Two-Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. / F.R. Menter //AIAA Paper 93-2306, 1993, .Jun.
48. Rodi W., Ferziger J.H., Breuer M., Pourquie M. Status of large-eddy-simulation results of workshop/ W. Rodi, J.H. Ferziger, M. Breuer, M. Pourquie // Journal of Fluids Engineering. – 1997. - V. 119(2). -P. 248-262.
49. Spalart P.R. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES Approach./ Spalart P.R., Jou W.H., Strelets M. and Allmaras S.R. // Proceedings of 1 st AFOSR International Conference, Ruston, LA, August, 4-8, 1997. - Greyden Press, Columbus, OH, 1997. - P.137-147.
50. Breuer M. Comparison of DES, RANS and LES for the separated flow around a flat plate at high incidence/ M.Breuer, N.Jovicic and K.Mazaev // Int. J. Numer. Meth. Fluids. – 2003. -V. 41. -P. 357-388.
51. Ferziger J. H. Recent Advances in Large Eddy Simulation/ J. H. Ferziger // Engineering Turbulence Modelling and Experiments 3, [W. Rodi and G. Bergeles (Editors)]Elsevier, 1996. -P. 163-176.
52. Spalart P. R. Editorial: RANS modeling into a second century/ P. R.Spalart //Special issue of International J. of CFD, 2009. -V.23, №.4. -P.291-293.



53. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD/ D. C. Wilcox - Griffin Printing, Glendale, California, 1993.
54. Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flows / M. Strelets // AIAA Paper 2001-0879, 2001.
55. Shur M. High-Order Implicit Multi-Block Navier-Stokes Code: Ten-Years Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulent Flows, Invited lecture / M. Shur , M. Strelets, A. Travin // 7th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology, October 5-7, 2004, Huntington Beach, USA.
56. Spalart P. R. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities/ P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. Kh. Strelets, A. Travin // Theoretical Computational Fluid Dynamics. -2006. - V. 20. - P. 181–195.
57. Spalart P. R. Detached-Eddy Simulation / P. R. Spalart // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2009. -V. 41, № 1. - P. 181-202.
58. Shur M. L., A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities / M. L. Shur, P. R. Spalart, M. K. Strelets, A. K. Travin International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. -V. 29. -P. 1638-1649.
59. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2х т., т. 2: [Пер. с англ.]/ Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990.
60. Garnier E. Large eddy simulation for compressible flows/ E. Garnier, N. Adams, P. Sagaut -Springer, 2009. - 276 p.
61. Baldwin B. S. Thin-layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows / B. S. Baldwin, H. Lomax // AIAA Paper 78-257. - 1978.
62. Fröhlich J. Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows / J. Fröhlich, D. von Terzi // Progress in Aerospace Sciences. - 2008. - V. 44, № 5. - P. 349–377.
63. Germano M. A dynamic sub-grid-scale eddy viscosity model / M. Germano , U. Piomelli , P. Moin , W. H. Cabot // Physics of Fluids. - 1991. - V. 3, № 7. - P. 1760–1765.
64. Germano M. Turbulence: the filtering approach / M. Germano // Journal of Fluid Mechanics. - 1992. - V. 238. - P. 325–336.

65. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. - London: Academic Press, 1972.
66. Lilly D. K. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Model / D. K. Lilly // Physics of Fluids. - 1992. - V. 4, № 3. - P. 633–635.
67. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F. R. Menter // AIAA Journal. - 1994. - V. 32, № 8. - P. 1598–1605.
68. Menter F. R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 [Ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers]. - Begell House Inc., 2003. - P. 625–632.
69. Menter F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective / Menter F. R. // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2009. Vol. 23, No 4, P. 305–316
70. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. — Washington DC: Hemisphere, 1980. — 214 p.
71. Pope S. B. Turbulent Flows. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. — 771 p.
72. Shih T.-H. A New  $k$ - $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows — Model Development and Validation/ T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. A. Zhu // Computers and Fluids.- 1995. - V. 24, № 3 -. P. 227–238.
73. Wallin S. A complete explicit algebraic Reynolds stress model for incompressible and compressible turbulent flows / S. Wallin, A. Johansson // Journal of Fluid Mechanics. - 2000. - V. 403. - P. 89–132.
74. Yakhot V. Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory / V. Yakhot, S. A. Orszag // Journal of Scientific Computing. - 1986. - V. 1, № 1. - P. 1–51.
75. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика Т.1. – СПб: Гидрометеоиздат, 1996. – 696 с.
76. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика Т.2. – СПб: Гидрометеоиздат, 1996. – 744 с.

77. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Физматлит, 1994. – 444 с.
78. Boris J.P. New insights into large eddy simulation / J.P. Boris, F.F. Grinstein, E.S. Oran, R.L. Kolbe // Fluid Dynamics Research. - 1992. - V. 10, № 2. - P. 199-228.
79. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. – М.: Физматлит, 1995. – 368 с.
80. Echehki T., Mastorakos E. Turbulent Combustion Modeling: Advances, New Trends and Perspectives/ T. Echehki, E. Mastorakos // Fluid mechanics and its applications. –2011. -V. 95. -P. 513
81. Peters N: Turbulent Combustion. - Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000. -304 p.
82. Poinso T., Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion, 2nd Ed. [Ed. R.T. Edwards ]- Philadelphia, USA, 2005. – 540 p.
83. Fox, R.O.: Computational Models for Turbulent Reacting Flows, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2003)
84. Cant, R.S., Mastorakos, E.: An Introduction to Turbulent Reacting Flows, Imperial College Press, London, UK (2008)
85. Libby, P.A., Williams, F.A. (Eds): Turbulent Reacting Flows, Academic Press, London, UK (1994)
86. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова, под ред. П.А. Власова. – М. : Физматлит, 2003. – 352 с.
87. Veynante Denis. Turbulent combustion modeling / Denis Veynante, Luc Vervich // Progress in Energy and Combustion Science. – 2002. – P. 193-266.
88. Bilger, R.W., Pope, S.B., Bray, K.N.C., Driscoll, J.M.: Paradigms in turbulent combustion. Proceedings of the Combustion Institute 30, 21–42 (2005).
89. Peters N. Laminar Diffusion Flamelet Models in Non Premixed Combustion / N. Peters // Prog. Energy Combust. Sci. - 1984. – Vol. 10. – P. 319-339.(1986). Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, Twenty-First Symposium

- (International) on Combustion, pages 1231–1250, The Combustion Institute, Pittsburgh.
90. Peters N. Multiscale combustion and turbulence / N. Peters // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – Vol. 32. – P. 1–25.
  91. Klimenko A.Y., Bilger, R.W.: Conditional moment closure for turbulent combustion/ A.Y.Klimenko, R.W.Bilger //Prog. Energy Combust. – 1999, Sci. 25/ - P. 595–688.
  92. Klimenko A.Y. A model for turbulent reactive flows based on multiple mapping conditioning / A.Y. Klimenko, S.B. Pope //Phys. Fluids. - 2003. – 15. –P. 1907–1925.
  93. Ravi D. Large Eddy Simulation of Triangular Bluff-Body Stabilized Flames in Partially Premixed Condition / D. Ravi // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2014. – Vol. 20(10). – P. 1234–1238.
  94. Bagheri G. Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture / G. Bagheri, S. E. Hosseini, M. A. Wahid // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 67. – P. 266–272.
  95. Subramanian V. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner / V. Subramanian, P. Domingo, L. Vervisch // Combustion and Flame. – 2010. – Vol. 157. – P. 579–601.
  96. Lawal M. S. Numerical Study of Emission Characteristics of a Jet Flame in Cross-Flow / M.S. Lawal, M. Fairweather, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, and A. Williams // Combustion Science and Technology. –2010. – Vol. 182: 10. – P. 1491–1510.
  97. Paravento F. A robust numerical model for premixed flames with high density ratios based on new pressure correction and IMEX schemes / F. Paravento // Journal of Computational Physics. – 2010. – Vol. 229. – P. 4613–4647.
  98. Jaeyeob Seo Combustion Simulation of a Diesel Engine in the pHCCI Mode with Split Injections by the Spatially Integrated CMC Model / Seo Jaeyeob, Lee Dongkyu , Huh Kang Y., Chung Jaewoo // Combustion Science and Technology. – 2010. – Vol. 182: 9. – P. 1241–1260.

99. Wan J. Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of premixed hydrogen/air flame in a micro-combustor with a bluff body / J. Wan, A. Fan, K. Maruta, H. Yao, W. Liu // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37. – P. 19190-19197.
100. Fureby C. LES of a Multi-burner Annular Gas Turbine Combustor / C. Fureby // *Flow Turbulence Combust.* – 2010. – Vol. 84. – P. 543–564.
101. Carlssona H. Large eddy simulations and rotational CARS/PIV/PLIF measurements of a lean premixed low swirl stabilized flame / H. Carlssona, E. Nordströmb, A. Bohlinb, P. Peterssonb, Y. Wua, R. Collinb, M. Aldénb, P.-E. Bengtssonb, X.-S. Baia // *Combustion and Flame*. – 2014. – Vol. 161, Issue 10. P. 2539–2551.
102. Ren Z. Simulations of a turbulent non-premixed flame using combined dimension reduction and tabulation for combustion chemistry / Z. Ren, G. M. Goldin, V. Hiremath, S. B. Pope // *Fuel*. 2013– 105. – P. 636–644.
103. Lim Jaeman Combustion Modeling of Split Injection in HSDI Diesel Engines / Jaeman Lim, Sangyul Lee and Kyoungdou Min // *Combustion Science and Technology*. – 2011. – Vol. 183: 2. – P. 180–201.
104. Zimont V. Gas Premixed Combustion at High Turbulence. Turbulent Flame Closure Model Combustion Model / V. Zimont // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2000. – Vol.21. – P. 179–186.
105. Coelho P. J. Approximate Solutions of the Filtered Radiative Transfer Equation in Large Eddy Simulations of Turbulent Reactive Flows / P. J. Coelho // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156. – P. 1099-1110.
106. Karagiannidis S. Numerical investigation on the start-up of methane-fueled catalytic microreactors /S. Karagiannidis, J. Mantzaras// *Combustion and Flame*. – 2010. – V. 157. - P. 1400–1413.
107. Jones W.P. Numerical study of n-heptane auto-ignition / W.P. Jones, S. Navarro-Martinez // *Flow Turbul. Combust.* – 2009. – V. 83. – P. 407–423.
108. Kakutkina N. A. Modeling of Unsteady Filtration Gas Combustion / N. A. Kakutkina, A. D. Rychkov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2010. – V. 46, №. 3. – P. 279–285.

109. Lacaze G A non-premixed combustion model based on flame structure analysis at supercritical pressures / G. Lacaze, J.C. Oefelein // *Combustion and Flame*. – 2012. – V.159. – P. 2087–2103.
110. Malalasekera W. LES of Recirculation and Vortex Breakdown of Swirling Flames / W. Malalasekera, K. K. J. Ranga-Dinesh, S. S. Ibrahim, A. R. Masri // *Combustion Science and Technology*. – 2008. – V. 180(5). – P. 809–832.
111. Bagheri G. Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture / G. Bagheri, S. E. Hosseini, M. A. Wahid // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – V. 67. – P. 266–272.
112. Navarro-Martinez, S. LES-CMC simulations of a turbulent bluff-body flame [Text] / S. Navarro-Martinez, A. Kronenburg // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – V. 31. – P. 1721–1728.
113. Subramanian V. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner / V. Subramanian, P. Domingo, L. Vervisch // *Combustion and Flame*. – 2010. – V. 157. – P. 579–601.
114. Triantafyllidis, A. Large Eddy Simulations of forced ignition of a non-premixed bluff-body methane flame with Conditional Moment Closure [Text] / A. Triantafyllidis, E. Mastorakos, R. L. G. M. Eggels // *Combustion and Flame*. – 2009. – V. 156. – P. 2328–2345.
115. Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A. Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material / *Proceedings of the European Combustion Meeting – 2015, Paper P4-16, March 30 – April 2, 2015, Budapest, Hungary*.
116. Pope D.N. Numerical simulation of fuel droplet extinction due to forced convection / D.N. Pope, G. Gogos // *Combustion and Flame*. – 2005. – V. 142. – P. 89–106.
117. Lacaze G. Large Eddy Simulation of spark ignition in a turbulent methane jet / G. Lacaze, E. Richardson, T. Poinot // *Combust. Flame*. – 2009. – V. 156. – P. 1993–2009.
118. Jones W.P. Study of hydrogen auto-ignition in a turbulent air co-flow using a Large Eddy Simulation approach / W.P. Jones, S. Navarro-Martinez // *Comput. Fluids*. – 2008. – V. 37. – P. 802–808. Eskimo Barbie 1982

119. Jones W.P. Large Eddy Simulation of evaporating kerosene and acetone sprays / W.P. Jones, S. Lyra, A.J. Marquis // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2010. – V. 53. – P. 2491–2505.
120. Apte S.V. Large Eddy Simulations of evaporating spray in a coaxial combustor / S.V. Apte, K. Mahesh, P. Moin // *Proceedings of the Combustion Institute.* - Amsterdam : Elsevier. - 2009. – V. 32. – P. 2247–2256.
121. Achim Daniela. Numerical investigation of full scale coal combustion model of tangentially fired boiler with the effect of mill ducting / Daniela Achim, J. Naser, Y.S. Morsi, S. Pascoe // *Heat Mass Transfer.* – Berlin : Springer-Verlag. - 2009. – V. 46, Issue 1. – P. 1-13.
122. Snegirev A.Yu. Treatment of local extinction in CFD fire modeling/ A.Yu. Snegirev, A.S. Tsoy // *Proceedings of the Combustion Institute.*-2015. –V. 35, Issue 3.- P. 2519–2526.
123. Ottino G. M. Combustion Modeling Including Heat Loss Using Flamelet Generated Manifolds: A Validation Study in OpenFOAM/ G. M. Ottino , A. Fancello, M. Falcone, R. J. M. Bastiaans, L. P. H. de Goey // *Flow, Turbulence and Combustion*, April 2016. - V. 96, Issue 3. -P. - 773-800.
124. Zhang F. Direct numerical simulation of PRF70/air partially premixed combustion under IC engine conditions/ F. Zhang, R. Yu, X.S. Bai // *Proceedings of the Combustion Institute.* –2015. –V. 35, Issue 3. – P. 2975–2982.
125. Bertrand Naud. Winklinger RANS modelling of a lifted  $H_2/N_2$  flame using an unsteady flamelet progress variable approach with presumed PDF / Bertrand Naud, Ricardo Novella, José Manuel Pastor, Johannes F. // *Combustion and Flame.* - 2015. –V. 162, Issue 4. – P. 893–906.
126. Thomas Livebardon. Combining LES of combustion chamber and an actuator disk theory to predict combustion noise in a helicopter engine / Thomas Livebardon, Stéphane Moreau, Laurent Gicquel, Thierry Poinsot, Eric Bouty // *Combustion and Flame.* – 2016. – V. 165. – P. 272–287.
127. Ahmed U. Modelling flame turbulence interaction in RANS simulation of premixed turbulent combustion / U. Ahmed, R. Prosser // *Combustion Theory and Modelling.*-

2016. –V. 20, Issue 1. –P. 34-57.
128. Xingsi Han. Simulation of the flame describing function of a turbulent premixed flame using an open-source LES solver/ Xingsi Han , Aimee S. Morgans // *Combustion and Flame*. –2015. –V. 162, Issue 5. – P. 1778–1792.
129. Simon Gallot-Lavallée. Large Eddy Simulation of Spray Auto-ignition Under EGR Conditions/ Simon Gallot-Lavallée, W. P. Jones // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2016. – V. 96, Issue 2. –P. 513–534.
130. Brauner T. LES of the Cambridge Stratified Swirl Burner using a Sub-grid pdf Approach/ T. Brauner, W. P. Jones, A. J. Marquis // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2016. –V. 96, Issue 4. –P. 965–985.
131. Lipatnikov A. N. DNS assessment of relation between mean reaction and scalar dissipation rates in the flamelet regime of premixed turbulent combustion / A. N. Lipatnikov, S. Nishiki, T. Hasegawa // *Combustion Theory and Modelling*. -2015. V. 19, Issue 3. –P. 309-328.
132. Hua-Guang Li. A Large-Eddy-Simulation Study of Combustion Dynamics of Bluff-Body Stabilized Flames/ Hua-Guang Li, Prashant Khare, Hong-Gye Sung & Vigor Yang // *Combustion Science and Technology*. - 2016. - V. 188, Issue 6. – P. 924-952.
133. Demosthenous E. Direct Numerical Simulations of Dual-Fuel Non-Premixed Autoignition / E. Demosthenous, E. Mastorakos, R. S. Cant // *Combustion Science and Technology*. –2016. - Volume 188, Issue 4-5. –P. 542-555.
134. Labahn J.W. Large Eddy Simulations (LES) including Conditional Source-term Estimation (CSE) applied to two Delft-Jet-in-Hot-Coflow (DJHC) flames / J.W. Labahn, C.B. Devaud // *Combustion and Flame*. – 2016. –V. 164. – P. 68–84.
135. Magnussen B.F.: On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion/ B.F Magnussen, B.H. Hjertager // *Proc. Combust. Inst.* – 1976. –V. 16. -P. 719–729.
136. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames / D.B. Spalding // *Proc. Combust. Inst.* – 1971. – V.13. – P. 649–657.
137. Peters N. Local quenching due to flame stretch and non-premixed turbulent



- combustion // N. Peters /Combust. Sci. Techol. – 1983. – V.30. – P. 1–17.
138. Pope S.B. The statistical theory of turbulent flames/ S.B. Pope //Philos. Trans., Roy. Soc. London Ser. A291, 1979. – P.529–568.
139. Muppidi S. Direct numerical simulation of round turbulent jets in crossflow/ S. Muppidi, K. Mahesh // J. Fluid Mech. – 2007. – V. 574. - P. 59–84.
140. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства / Ю.В. Иванов. - М.: Недра, 1972. - 376 с.

## ДОДАТОК А

### Рекомендації щодо застосування типоряду мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я

1. Циліндричні пальникові пристрої потужністю від 30 до 200 кВт слід застосовувати:

- а) у вогнетехнічних об'єктах порівняно невеликої потужності;
- б) у вогнетехнічних об'єктах різної теплопродуктивності, до яких пред'являються високі вимоги в щодо рівномірності теплопідводу по вогневому простору;

2. Значення основних конструктивних і режимних параметрів циліндричних пальникових пристроїв повинні відповідати рекомендованим значенням.

3. Для запропонованого типоряду гладких циліндричних пальникових пристроїв регулювання процесу сумішоутворення і відповідно довжини факела може здійснюватися за допомогою зміни відстані  $L_1$  між зривної кромкою стабілізатора і виходом газу з отворів. При цьому:

а) у вогнетехнічних об'єктах відносно малої потужності, що вимагають короткого факела, газоподавальні отвори повинні бути глибоко втоплені в амбразурі пальника, тобто відстань  $L_1$  слід вибирати відносно великою, так щоб відношення  $L_1/d$  знаходилося в діапазоні  $17 \leq L_1/d \leq 30$ ;

б) у вогнетехнічних об'єктах порівняно великої потужності з відносним довгим факелом полум'я струмені повинні розташовуватися поблизу устя пальника, так щоб відношення  $L_1/d \leq 5$ ;

в) при необхідності реалізації умов коли до устя пальника надходить суміш, практично повністю знаходиться в концентраційних межах займання, величина  $L_1/d$  повинна дорівнювати 35.

4. З метою інтенсифікації процесу вигорання палива і підвищення стійкості факела доцільно застосовувати циліндричні пальникові пристрої з кільцевими прямокутними нішами.

5. Конструктивні характеристики модифікації типоряду циліндричних пальникових пристроїв з кільцевими нішами повинні відповідати рекомендованим параметрам.

6. Для підвищення інтенсивності процесу горіння ефективно застосування пластинчастих турбулізаторів потоку, встановлених на зривних кромках стабілізаторів.

7. Кількість турбулізаторів потоку та їх геометричні характеристики для даної модифікації типоряду циліндричних пальникових пристроїв визначається згідно з розробленими рекомендаціями.

**ДОДАТОК Б**  
Акт впровадження



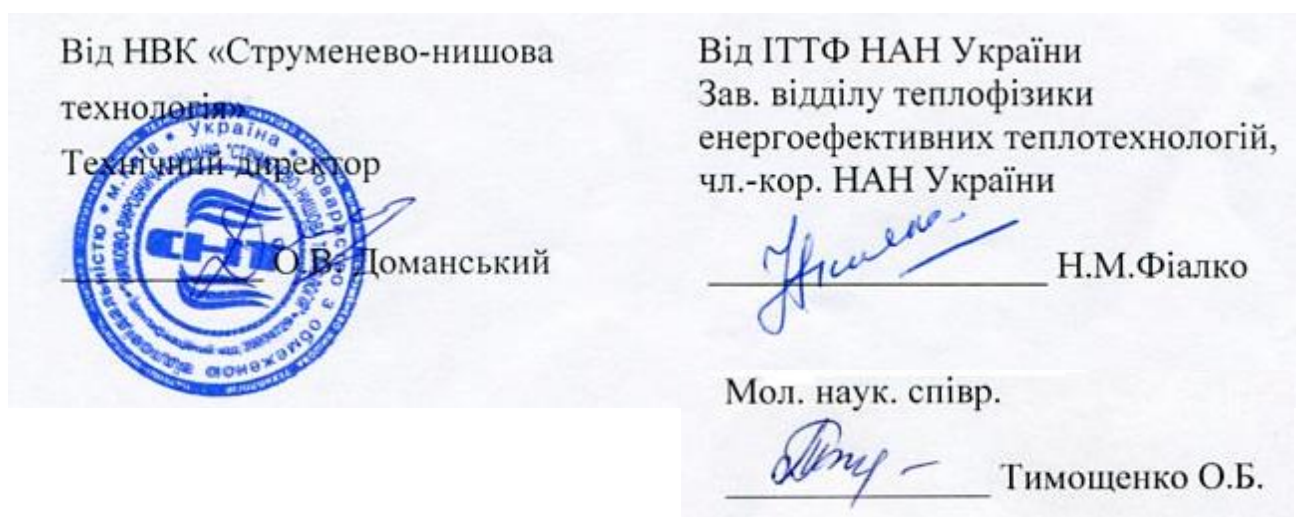
### А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи Тимощенко О.Б.  
«Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних  
пальникових пристроях малої потужності»

Даний акт складений про те, що у НВК «Струменево-нишова технологія» впроваджено розроблені за результатами вказаної дисертаційної роботи технологія спалювання газоподібного палива та відповідні мікрофакельні пальникові пристрої малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я.

Мікрофакельні пальники із циліндричними стабілізаторами полум'я мають ряд суттєвих переваг перед традиційними пальниковими пристроями з плоскими стабілізаторами полум'я за умов малої потужності вогнетехнічного об'єкту та при необхідності реалізації високого ступеня рівномірності теплопідводу по вогневому простору.

Вказані технологія та пальникові пристрої впроваджено на сушилах фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу «НІСТУ», Е-1.0-0, 9ГН-2 тощо.



**ДОДАТОК В**

Патент України

