

УДК 621.452.2.022

doi: 10.32620/aktt.2023.3.05

О. С. АКСЬОНОВ^{1, 2}, О. Є. ЗОЛОТЬКО¹¹ Дніпровський національний університет імені О. Гончара, Дніпро, Україна² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»», Дніпро, Україна

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ДЕТОНАЦІЙНОГО ПОТОКУ

Предметом дослідження є процеси, які відбуваються під час утворення та розповсюдження детонаційної хвилі у плоскому каналі. **Метою** роботи є дослідження особливостей складної багатифронтної структури детонаційної хвилі та її впливу на інтегральні параметри детонаційного потоку. **Завдання дослідження:** виявлення закономірностей процесу утворення та розповсюдження фронту детонаційної хвилі; встановлення характеру впливу структури фронту детонації на процеси, які протікають у зоні сталих параметрів потоку; аналіз газодинамічних параметрів потоку на завершальному етапі процесу – на етапі розповсюдження хвиль розрідження. Основним **методом** дослідження є метод математичного моделювання з використанням комп'ютерних CFD технологій розрахунку (пакету ANSYS Fluent). Основні **результати дослідження:** встановлено, що значення газодинамічних параметрів у потрібних точках ударних хвиль є значно більшими, ніж відповідні значення у піку Неймана, а в областях між потрібними точками – значно меншими; значення осереднених по перерізу фронту детонаційної хвилі параметрів майже не відрізняються від значень параметрів у піку Неймана; осереднена по перерізу потоку швидкість розповсюдження детонаційної хвилі також відповідає розрахунковій швидкості по моделі Чепмена-Жуге; за межами зони хімічних реакцій утворення потрібних конфігурацій неможливе, тому швидкість фронту детонаційної хвилі буде менша від значень Чепмена-Жуге, що впливатиме на подальші процеси розповсюдження детонаційної течії; процеси утворення та розповсюдження фронту детонаційної хвилі певним чином впливають на розподіл усталених параметрів течії, при цьому хвильові процеси розповсюджуються на зону Тейлора, що призводить до значної турбулізації пристінкового шару; завдяки турбулізації пристінкового шару збільшується інтенсивність конвективних теплових потоків у стінку каналу. **Висновок:** отримані результати добре узгоджуються з результатами відомих експериментальних досліджень та можуть бути використані при розрахунку інтегральних імпульсних характеристик камери детонаційного двигуна та при проектуванні системи її охолодження.

Ключові слова: детонація; математичне моделювання; структура фронту детонаційної хвилі.

Вступ

Поява нових експериментальних даних, які не відповідали класичній теорії Чепмена-Жуге [1, 2], призвела до необхідності більш детального вивчення структури детонаційного потоку. У період між 1940 р. та 1944 роком була представлена нова уточнена модель детонації Зельдовича – фон Неймана – Дьорінга (ЗНД) [3], у якій вказується на наявність області високого тиску на фронті детонаційної хвилі (ДХ). У другій половині 20-го століття дослідження процесу детонації були продовжені зусиллями таких відомих вчених як Л. Д. Ландау, К. І. Щолкін, Р. І. Солюхін та інших [4]. Подальше експериментальне дослідження детонаційних потоків дозволило виявити більш детальну картину структури детонаційної хвилі. З'ясувалось, що реальна ДХ має складну комірчасту структуру із значними неоднорідностями [5]. Це вказувало на обмеженість ЗНД моделі: вона є нестійкою для реальних хімічних реакцій, які мають сильну залежність від температури. Детальне вивчення

детонації потребувало досконалішого експериментального обладнання, тому подальший розвиток досліджень зазнав певної стагнації. Але на сучасному етапі розвиток комп'ютерних технологій надав додатковий поштовх до продовження наукових досліджень процесів детонації.

1. Постановка задачі

Детонація у газовому середовищі супроводжується утворенням складної багатовимірної структури на фронті детонаційної хвилі [6]. Фізичні процеси протікають з надвисокою швидкістю, що значно ускладнює експериментальне дослідження детонації. Сучасні обчислювальні методи дозволяють досліджувати явища та ефекти, які експериментальними методами навіть із залученням складної апаратури виявити достатньо важко. Тому використання методів математичного моделювання є одним із кращих способів дослідження детонаційних потоків.

Більшість сучасних досліджень структури детонаційної течії зосереджено на явищах, які протікають на фронті ДХ та під час переходу від дефлаграційного до детонаційного горіння [7, 8].

Метою цієї роботи є дослідження особливостей процесів, які протікають на всіх етапах розповсюдження детонації: на фронті детонаційної хвилі, у зоні сталих параметрів та під час виходу продуктів детонації з каналу.

2. Основні параметри та граничні умови розрахункової моделі

Для проведення чисельного дослідження використовувався програмний комплекс Ansys Fluent [9]. У якості об'єкту дослідження розглядалась циліндрична детонаційна камера (ДК) діаметром 50 мм. Основні параметри розрахункової моделі: використовувалась SST k - ω модель турбулентності з урахуванням ефекту стиснення речовини; модель горіння, яка враховує кінцеві швидкості реакцій за рівнянням Ареніуса та особливості турбулентного перемішування компонентів; AUSM метод для вирішення рівнянь потоку. Головною особливістю моделі являється динамічна адаптація сітки за градієнтом густини. Це дозволяє детальніше дослідити явища, які протікають у ДК, і знизити витрати обчислювальної потужності. Адаптація сітки зменшувала розмір розрахункової комірки до величини 0.0625 мм. Така величина комірки дозволяє виявити важливі особливості, що протікають на мікрорівні у фронті детонаційної хвилі. Результати математичного моделювання з обраним набором вихідних параметрів добре узгоджуються з відомими експериментальними даними [10]. Початковими умовами було заповнення камери стехіометричною сумішшю кисню та водню при початковому тиску 0.1 МПа та температурі 300 К. Для детального дослідження фронту детонаційної хвилі крок у часі не перевищував 20 наносекунд.

Слід зазначити, що крок за часом та найменший розмір комірки залежать від величини початкового тиску, оскільки значення тиску впливає на здатність виявляти потрібні точки на фронті детонаційної хвилі [11].

3. Результати моделювання детонаційної течії

У межах камери можна виділити три основні часові проміжки детонаційного процесу: проходження фронту детонаційної хвилі, перебування у зоні сталих параметрів (зона Тейлора) та вихід продуктів детонації з детонаційної камери.

3.1. Дослідження структури фронту детонаційної хвилі

Основним процесом, від якого залежить подальший розвиток усього процесу, є утворення та розповсюдження фронту ДХ. Згідно класичній теорії фронт ДХ представляє собою гідродинамічний нормальний розрив з наявною областю високого тиску. Однак детальне дослідження детонації вказує на більш складну структуру фронту [6].

Аналіз отриманих результатів математичного моделювання показує, що фронт ДХ представляє собою комплекс постійно взаємодіючих ударних хвиль. У момент зустрічі двох та більше падаючих хвиль відбувається стиснення паливної суміші та різке збільшення тиску у малому об'ємі. Це спричиняє хімічну взаємодію компонентів палива (горіння), яка супроводжується швидким вивільненням великої кількості енергії за короткий проміжок часу. Завдяки такому мікрровибуху виділяється значна кількість енергії, що породжує нову ударну хвилю, яка починає взаємодіяти з вже існуючими. Цей процес продовжується до поки відбуватиметься хімічна взаємодія. Такі малі зони взаємодії хвиль отримали назву потрійних точок. Залишковий слід від взаємодії ударних хвиль на фронті ДХ утворює відому комірчасту структуру [5]. При моделюванні її можна побачити завдяки використанню адаптованої сітки (рис. 1, а), якщо відстежити переміщення зони взаємодії на певній ділянці фронту. На рисунку 1, б представлено зміну густини на фронті ДХ у часі, за якою видно утворення комірки. У проведеному дослідженні розміри детонаційної комірки змінювались у межах від 2 мм до 10 мм.

На рис. 2 представлено розподіл тиску у плоскому каналі детонаційної камери. Як видно, значення тиску у потрійних точках значно перевищують початкові.

Експериментальні дослідження детонації з використанням сучасного високоточного вимірювального обладнання [12] підтверджують отримані результати чисельного моделювання.

Результати чисельного дослідження вказують на складний характер розподілу величини швидкості по перерізу потоку (рис. 3). Як видно з рисунку, значення швидкості у потрійних точках перевищують величину 3000 м/с. При детальному дослідженні структури фронту ДХ можна побачити, що пікові значення швидкості перевищують величину швидкості Чепмена-Жуге D_{CJ} , у той же час значення швидкості детонації в інших зонах (між піками) є меншими за величину D_{CJ} .

За межами зони хімічних реакцій швидкість розповсюдження ДХ також буде меншою від значення D_{CJ} , оскільки відсутнє додаткове виділення енергії, яка підтримує інтенсивність розповсюдження ДХ.

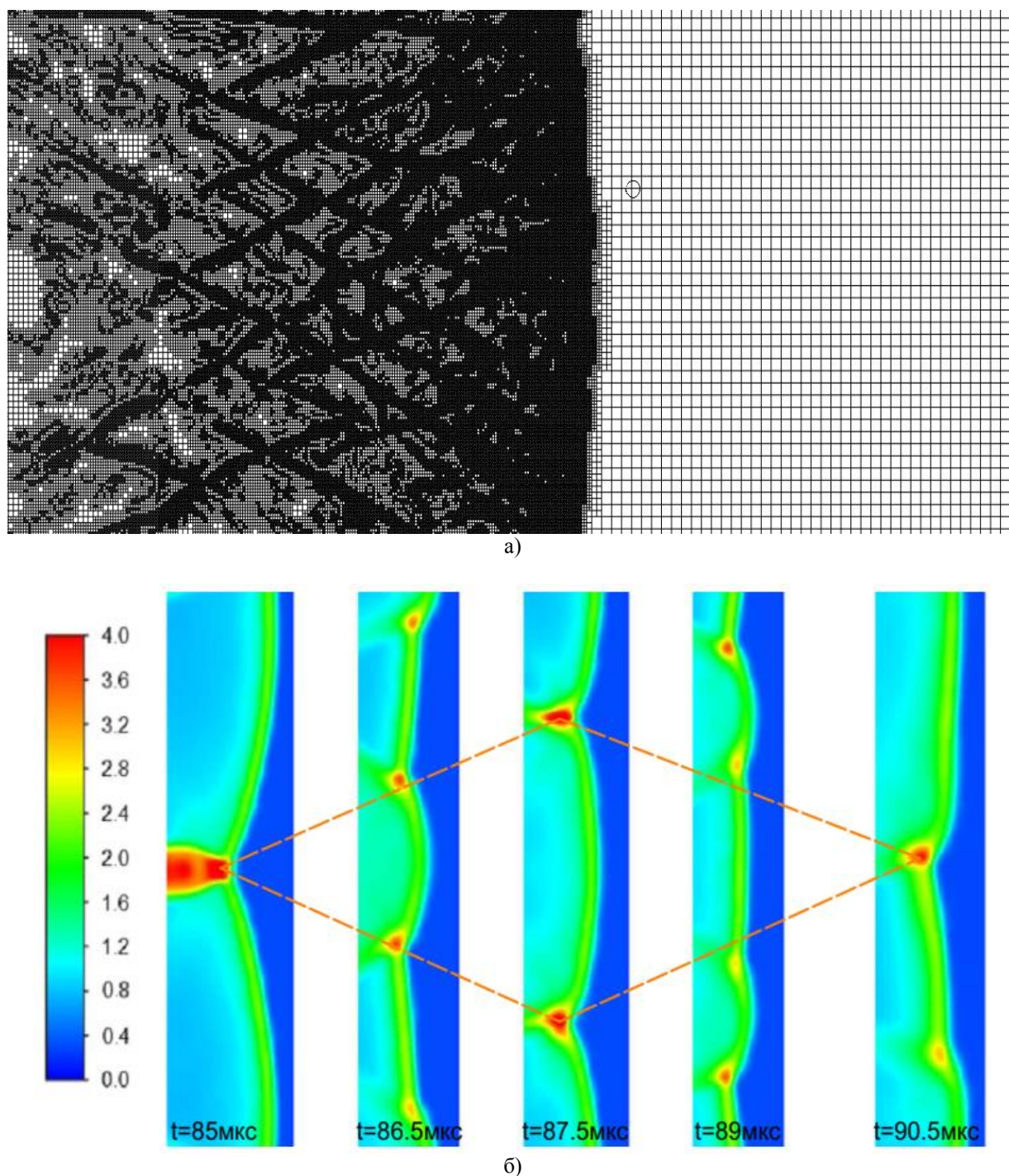


Рис. 1. Комірчаста структура детонації:
а) адаптована за градієнтом густини розрахункова сітка;
б) розподіл густини у розрахунковій області, кг/м^3

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що фронт детонаційної хвилі представляє собою набір потрібних конфігурацій, які постійно змінюють у часі своє положення.

3.2. Дослідження зони сталих параметрів

За фронтом ДХ розташовується зона відносно сталих параметрів детонації, відома у літературі як

зона Тейлора. За класичною теорією детонації у цій зоні рух вважається відсутнім, а інші параметри зберігають постійні значення. Результати більш точного аналізу вказують на те, що особливості утворення та характер розповсюдження фронту детонації спричиняють виникнення залишкових коливальних явищ. Такі коливання призводять до утворення поперечних хвиль за фронтом ДХ. Поперечні хвилі рухаються

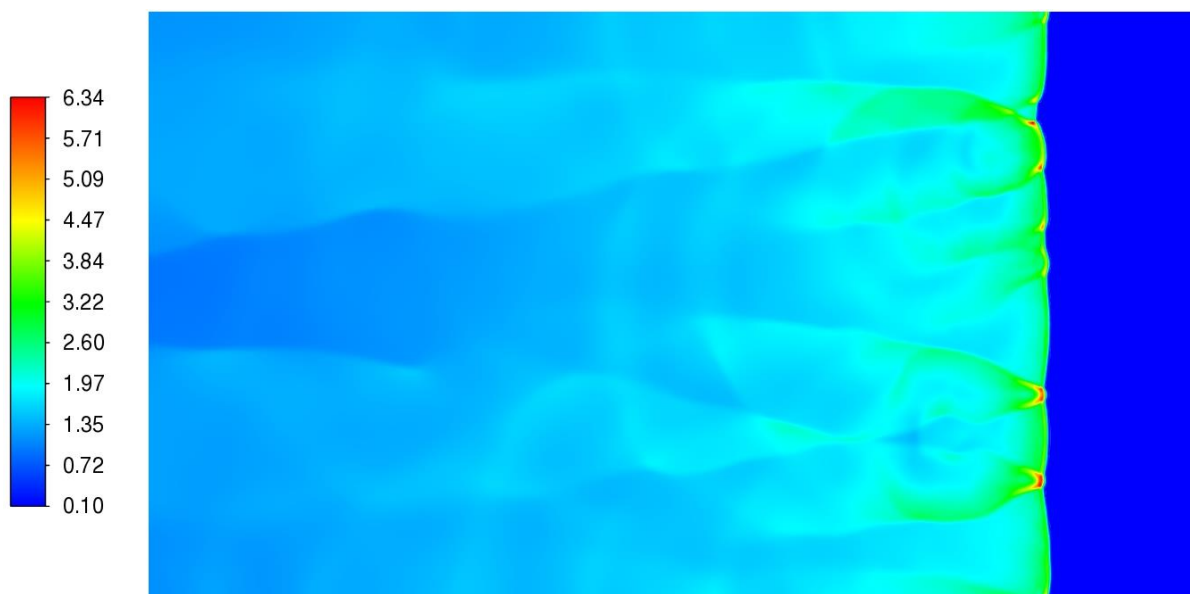


Рис. 2. Розподіл тиску в розрахунковій області моделі, МПа

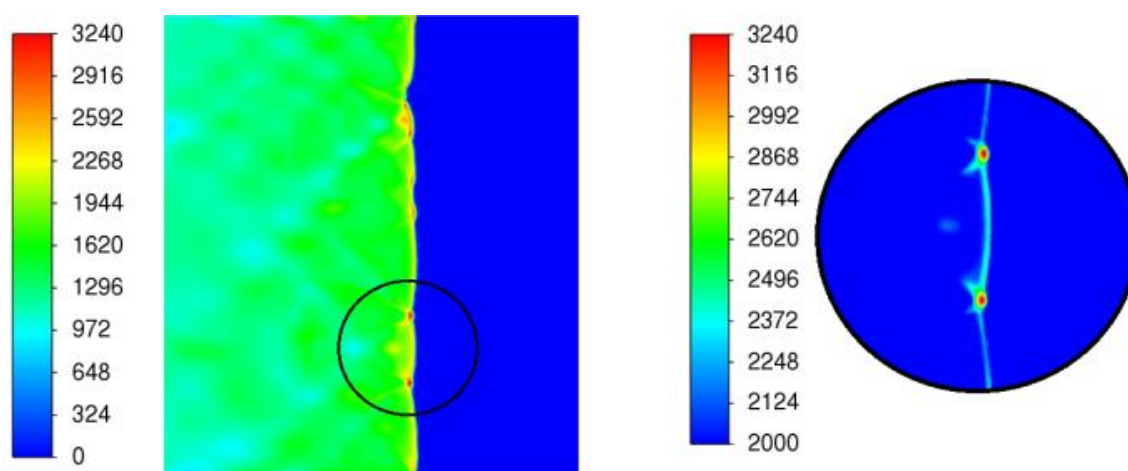


Рис. 3. Розподіл швидкості в розрахунковій області моделі, м/с

між стінками каналу з місцевою швидкістю звуку. Ці хвилі найкраще проявляють себе на ділянках адаптованої сітки (рис. 4): ліворуч показано розподіл градієнту густини потоку (видно, як змінюється розмір комірки розрахункової сітки), праворуч – абсолютні значення величини густини потоку. Коливальний процес триває до того моменту часу, коли продукти детонації не вийдуть з каналу до оточуючого середовища.

3.3. Дослідження процесу витікання продуктів детонації

Вважається, що на етапі спорожнення камери від продуктів детонації зміна параметрів починається у той момент часу, коли зворотна хвиля розрідження

досягає глухої стінки каналу. Отримані результати чисельного моделювання вказують на те, що зміна параметрів починається раніше, тобто вже на етапі, коли зворотна хвиля тільки прямує до глухої стінки каналу [10]. На рис. 5 зображено графік зміни тиску та швидкості у центральному перерізі камери. У момент часу, коли зворотна хвиля перетинає центральний переріз, починається поступове зменшення тиску та збільшення швидкості потоку. А у момент часу, коли зворотна хвиля розрідження, розвернувшись, рухається до виходу з каналу та відбувається вихід продуктів детонації до навколишнього простору, тиск та швидкість змінюються відповідно до відомої класичної моделі [13]. Причому у деякий момент часу швидкість зворотної хвилі досягає значення місцевої швидкості звуку.

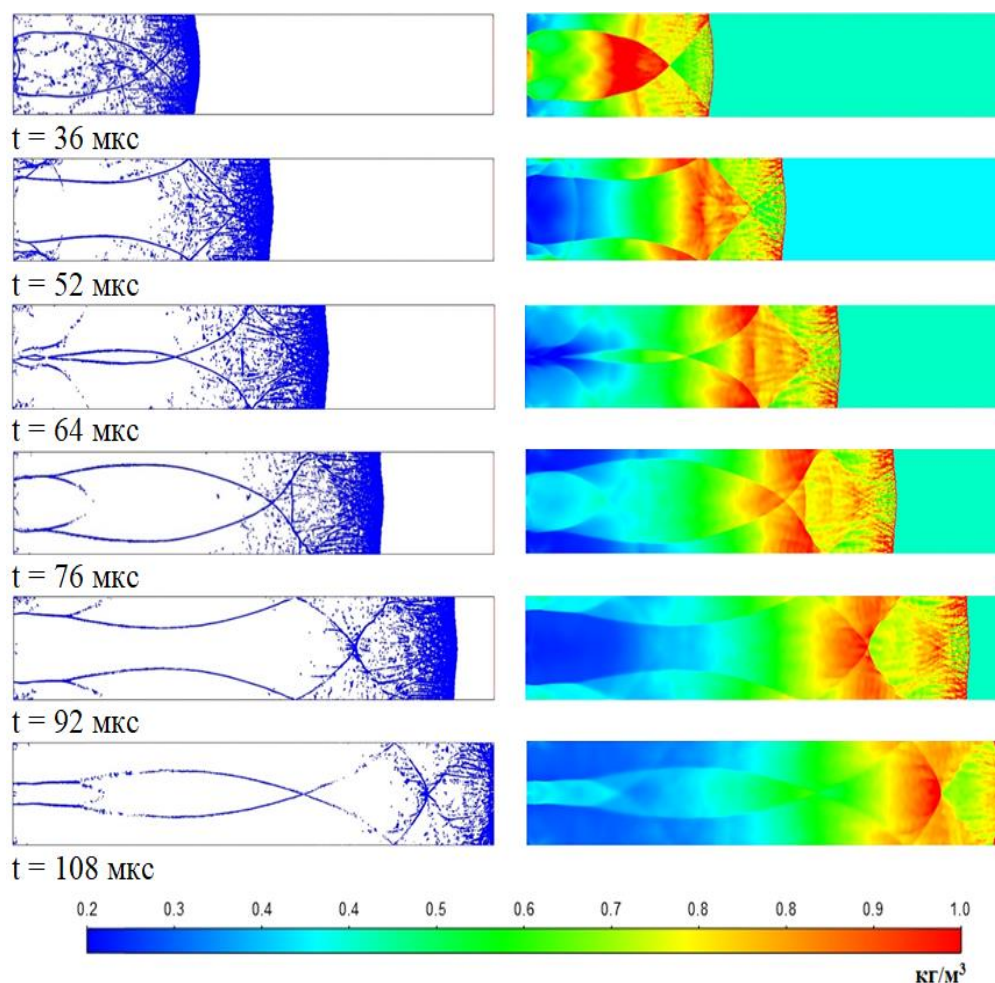


Рис. 4. Розповсюдження поперечних хвиль у плоскому каналі

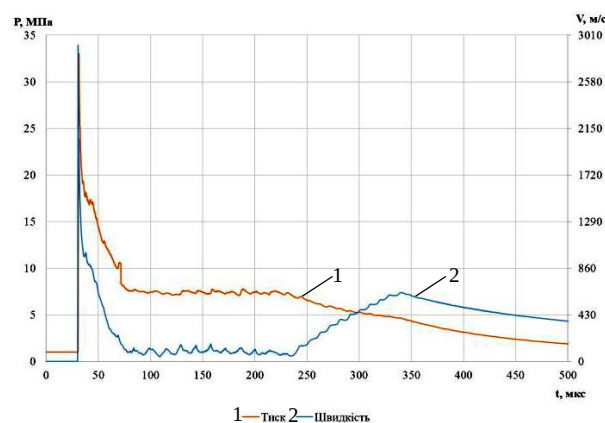


Рис. 5. Зміна тиску та швидкості в перерізі ДК за часом

4. Обговорення результатів дослідження та формулювання рекомендацій

Значення газодинамічних параметрів у потрійних точках вищі, ніж передбачають класичні теоре-

тичні моделі (табл. 1). Це підтверджується експериментальними результатами минулих років, заснованих на дослідженні сажових відбитків [5], сучасними дослідженнями структури фронту ДХ [11] та експериментами з використанням високоточної вимірювальної лазерної техніки [12, 14].

Таблиця 1

Основні параметри на фронті детонаційної хвилі

Параметр	Моделювання		ЗНД модель
	Потрійні точки	Середнє значення	
P, МПа	6.34	3.34	3.25
v, м/с	3240	2860	2835
T, К	2889	1964	1898
ρ , кг/м ³	4.669	3.618	3.658

За ЗНД моделлю тиск на фронті ДХ для стехіометричної киснево-водневої суміші повинен бути більшим від початкового приблизно у 32 рази.

А отримані дані (див. рис. 2) показують перевищення величини тиску більше, ніж у 60 разів. У деяких зонах спостерігалось ще більші підвищення тиску, але такі зони є дуже малими за розмірами та час їх існування незначний. При усередненні параметрів за перерізом каналу на фронті ДХ отримані значення тиску становлять 3.34 МПа, що відповідає розрахованій за ЗНД моделлю величині тиску у 3.25 МПа.

Враховуючи складну структуру та особливості формування фронту ДХ, величина швидкості розповсюдження детонації також підлягає осередненню. Згідно з теорією Чепмена-Жуге швидкість розповсюдження фронту ДХ D_{CJ} для розглянутої паливної композиції становить 2835 м/с, що підтверджено експериментально [4]. Осереднюючи значення швидкості потоку по всьому фронту ДХ отримаємо величину 2860 м/с, яка відповідає відомим експериментальним значенням D_{CJ} у межах похибки розрахунків (менше 2 %).

Наявність поперечних хвиль призводить до значної турбулізації потоку у пристінковому шарі біля стінок каналу (див. рис. 4). Поперечна хвиля ініціює перемішування між продуктами детонації в ядрі потоку, та продуктами, які знаходяться у пристінковому шарі. Турбулізація пристінкового шару поперечними хвилями сприяє інтенсифікації теплообміну від продуктів детонації до стінок каналу. Відбувається збільшення значення коефіцієнту тепловіддачі, що призводить до підвищення теплового навантаження на конструкцію. Це явище необхідно враховувати при проектуванні системи охолодження камер детонаційних двигунів.

Висновки

1. Узагальнені результати чисельного дослідження добре узгоджуються з результатами відомих експериментальних досліджень.

2. У ході чисельного дослідження отримана детальна картина утворення та розповсюдження фронту детонаційної хвилі. Аналіз отриманих результатів показав, що фронт детонаційної хвилі представляє собою набір потрійних конфігурацій, які постійно змінюють своє положення у часі та у просторі. Утворюється складна неоднорідна структура фронту детонаційної хвилі.

3. Величини тиску та швидкості у потрійних точках перевищують відомі з теорії значення величини тиску та швидкості у піку Неймана. При осередненні параметрів по всьому поперечному перерізі фронту детонації значення величин тиску та швидкості стають близькими до значень, передбачених теорією.

4. Результати математичного моделювання показали, що зменшення параметрів потоку під час виходу продуктів детонації з каналу починається у момент часу, коли зворотна хвиля знаходиться на шляху до глухої стінки. У цей час тиск починає знижуватись, а швидкість, навпаки, збільшуватись. У момент часу, коли зворотна хвиля вдруге проходить той самий переріз камери, рухаючись до виходу, швидкість має максимальне значення, яке відповідає місцевій швидкості звуку.

5. Однією з головних особливостей, виявлених при моделюванні, є наявність поперечних хвиль за фронтом ДХ, які сприяють значній турбулізації пристінкового шару. Турбулізація призводить до інтенсифікації теплообміну між продуктами детонації та стінками каналу. Зазначену особливість слід враховувати при проектуванні системи охолодження камери детонаційного двигуна.

Подальші дослідження процесу детонації обумовлені необхідністю визначення характеру впливу режимних факторів на тягові та теплові характеристики імпульсних детонаційних ракетних двигунів.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. С. Аксьонов**; формулювання мети і постановка задач дослідження – **О. Є. Золотько, О. С. Аксьонов**; вибір та використання програмно-технічних засобів для моделювання та представлення результатів – **О. С. Аксьонов**; аналіз результатів дослідження та формулювання рекомендацій – **О. С. Аксьонов**; формулювання висновків – **О. Є. Золотько, О. С. Аксьонов**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Chapman, D. L. VI. On the rate of explosion in gases [Text] / D. L. Chapman // *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics: Series 5*. – 1899. – Vol. 47, iss. 284. – P. 90-104. DOI: 10.1080/14786449908621243.

2. Jouquet, E. Sur la propagation des reactions chimiques dans les gaz [Text] / E. Jouquet // *Journal des Mathematiques Pures et Appliquees*. – 1905. – Vol. 1. – P. 347-425. – Available at: <https://eudml.org/doc/234706> – 12.12.2022.

3. Зельдович, Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах [Текст] / Я. Б. Зельдович // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1940. – Т. 10, вып. 5. – С. 542-568.

4. Soloukhin, R. I. Detonation waves in gases [Text] / R. I. Soloukhin // *Soviet Physics Uspekhi*. – 1964.

Vol. 6, no. 4. – Article no. 523. DOI: 10.1070/PU1964v006n04ABEH003586.

5. Shchelkin, K. I. Instability of combustion and detonation of gases [Text] / K. I. Shchelkin // *Soviet Physics Uspekhi*. – 1966. – Vol. 8, no. 5. – Article no. 280. DOI: 10.1070/PU1966v008n05ABEH003038.

6. Shepherd, J. E. Detonation in Gases [Text] / J. E. Shepherd // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2009. – Vol. 32, no. 1. – P. 83-98. DOI: 10.1016/j.proci.2008.08.006.

7. Dai, J. Numerical Investigation on Detonation Initiation and Propagation with a Symmetric-Jet in Supersonic Combustible Gas [Text] / J. Dai, L. Peng // *Aerospase*. – 2022. – Vol. 9, Iss. 9. – Article No. 501. – P. 1-19. DOI: 10.3390/aerospace9090501.

8. Statistical analysis of detonation wave structure in a Narrow Channel [Electronic resource] / M. D. Frederick, R. M. Gejji, J. E. Shepherd, C. D. Slabaugh // *Conference AIAA Scitech 2021 Forum*. AIAA 2021-0800. Session: Detonation Physics I. – 2022. – P. 1-9. DOI: 10.2514/6.2021-0800.

9. ANSYS Fluent Theory Guide 2019. Release 2019 R1 [Electronic resource]. – Available at: <https://ru.scribd.com/document/491750032/ANSYS-Fluent-Tutorial-Guide-2019#>. – 10.09.2022.

10. Аксьонов, О. С. Методика проведення чисельного дослідження камери імпульсного детонаційного двигуна [Текст] / О. С. Аксьонов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – №1 (185). – С. 47-54. DOI: 10.32620/akt.2023.1.05.

11. Кучинский, В. В. Оценка размера детонационной ячейки в газах [Текст] / В. В. Кучинский, И. И. Оносов // *Журнал технической физики*. – 2011. – Т. 81, № 6. – С. 14-19. – Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/articles/10325>. – 10.09.2022.

12. Mahmoudi, Y. Triple point collision and hot spots in detonation with regular structure [Text] / Y. Mahmoudi, K. Mazaheri // *Combustion Science and Technology*. – 2012. – Vol. 184, no. 7-8. – P. 1135-1151. DOI: 10.1080/00102202.2012.664004.

13. Pressure History at the Thrust Wall of a Simplified Pulse Detonation Engine [Text] / T. Endo, J. Kasahara, A. Matsuo, K. Inaba, S. Sato, T. Fujiwara // *AIAA Journal*. – 2004. – Vol. 42, Iss. 9. – P. 1921-1930. DOI: 10.2514/1.976.

14. Huang, X. Research on Optical Diagnostic Method of PDE Working Status Based on Visible and Near-Infrared Radiation Characteristics [Text] / X. Huang, N. Li, Y. Kang // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, no. 18. – Article No. 5703. – P. 1-14. DOI: 10.3390/en14185703.

References

1. Chapman, D. L. On the rate of explosion in gases. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics: Series 5*, 1899, vol. 47, iss. 284, pp. 90-104. DOI: 10.1080/14786449908621243.

2. Jouguet, E. Sur la propagation des reactions chimiques dans les gaz. *Journal des Mathematiques Pures et Appliquees*, 1905, vol. 1, pp. 347-425. Available at: <https://eudml.org/doc/234706> (accessed 12.12.2022).

3. Zel'dovich, Ya. B. K teorii rasprostraneniya detonatsii v gazoobraznykh sistemakh [On the theory of detonation propagation in gaseous systems]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1940, vol. 10, iss. 5, pp. 542-568.

4. Soloukhin, R. I. Detonation waves in gases. *Soviet Physics Uspekhi*, 1964, vol. 6, no. 4, article no. 523. DOI: 10.1070/PU1964v006n04ABEH003586.

5. Shchelkin, K. I. Instability of combustion and detonation of gases. *Soviet Physics Uspekhi*, 1966, vol. 8, no. 5, article no. 280. DOI: 10.1070/PU1966v008n05ABEH003038.

6. Shepherd, J. E. Detonation in Gases. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 83-98. DOI: 10.1016/j.proci.2008.08.006.

7. Dai, J., Peng, L. Numerical Investigation on Detonation Initiation and Propagation with a Symmetric-Jet in Supersonic Combustible Gas. *Aerospase*, 2022, vol. 9, iss. 9, article no. 501, pp. 1-19. DOI: 10.3390/aerospace9090501.

8. Frederick, M. D., Gejji, R. M., Shepherd, J. E. & Slabaugh, C. D. Statistical analysis of detonation wave structure in a Narrow Channel. *Conference AIAA Scitech 2021 Forum*. AIAA 2021-0800. Session: Detonation Physics I, 2022, pp. 1-9. DOI: 10.2514/6.2021-0800.

9. ANSYS Fluent Theory Guide 2019. Release 2019 R1. Available at: <https://ru.scribd.com/document/491750032/ANSYS-Fluent-Tutorial-Guide-2019#>. (accessed 10.09.2022).

10. Aksonov, O. S. Metodyka provedennya chysel'noho doslidzhennya kamery impul'snoho detonatsionnoho dvyhuna [Numerical experiment methodology for the chamber of a pulse detonation engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 1, pp. 47-54. DOI: 10.32620/akt.2023.1.05.

11. Kuchynskyy, V. V. & Onosov, Y. Y. Otsenka razmera detonatsionnoy yacheyki v gazakh [Detonation cell size estimation in gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki - Journal of Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 6, pp. 14-19. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/10325> (accessed 10.09.2022).

12. Mahmoudi, Y. & Mazaheri, K. Triple point collision and hot spots in detonation with regular structure. *Combustion Science and Technology*, 2012, vol. 184, no. 7-8, pp. 1135-1151. DOI: 10.1080/00102202.2012.664004.

13. Endo, T., Kasahara, J., Matsuo, A., Inaba, K., Sato, S. & Fujiwara, T. Pressure History at the Thrust Wall of a Simplified Pulse Detonation Engine. *AIAA*

Journal, 2004, vol. 42, iss. 9, pp. 1921-1930. DOI: 10.2514/1.976.

14. Huang, X., Li, N. & Kang, Y. Research on Optical Diagnostic Method of PDE Working Status Based on Visible and Near-Infrared Radiation Characteristics. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18, article no. 5703, pp. 1-14. DOI: 10.3390/en14185703.

Надійшла до редакції 08.05.2023, розглянута на редколегії 12.06.2023

STRUCTURAL FEATURES OF THE DETONATION FLOW

Oleksandr Aksonov, Oleksandr Zolotko

The **subject** of this research is the processes that occur during the formation and propagation of a detonation wave in a flat channel. The **goal** of this work is to study the features of the complex multiform structure of the detonation wave and its influence on the integral parameters of the detonation flow. The **task** of the research was to identify regularities during the formation process and propagation of the detonation wavefront, establish the nature of the influence of the detonation front structure on the processes that occur in the zone of stable flow parameters, and analyze the gas-dynamic parameters of the flow at the final stage of the process - at the stage of propagation of rarefaction waves. The main research **method** is mathematical simulation using CFD technologies (ANSYS Fluent package). The main **results** of the study: it was established that the values of gas-dynamic parameters at the triple points of shock waves are significantly greater than the corresponding values at the Neumann peak, and in the areas between the triple points are significantly smaller; the values of the parameters averaged over the cross-section of the detonation wave front almost do not differ from the values of the parameters at the Neumann peak; the propagation velocity of the detonation wave averaged over the cross-section of the flow also corresponds to the calculated velocity according to the Chapman-Jouguet model; outside the zone of chemical reaction, the formation of triple configurations is impossible, therefore the speed of the detonation wave front will be lower than the values of Chapman-Jouguet, which will affect the further processes of propagation of the detonation; the processes of formation and propagation of the detonation wave front in a certain way influence the distribution of steady flow parameters, while the wave processes spread to the Taylor zone, which leads to significant turbulence of the wall layer; due to the turbulence of the wall layer, the intensity of convective heat fluxes into the channel wall increases. **Conclusion:** the obtained results are in good agreement with the results of known experimental studies and can be used in the calculation of the integral impulse characteristics of the detonation engine chamber and in the design of its cooling system.

Keywords: detonation; mathematical simulation; structure of the detonation wave front.

Аксьонов Олександр Сергійович – асп. каф. двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна; інженер I категорії, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»», Дніпро, Україна.

Золотко Олександр Євгенович – канд. техн. наук, доц. каф. двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Oleksandr Aksonov – PhD student of Engines Construction Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; engineer of the first category, State Enterprise «Design office «Yuzhnoye»», Dnipro, Ukraine, e-mail: aksyonov.olexander@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5399-7292.

Oleksandr Zolotko – Candidate of Technical Science (PhD), Associate Professor of Department of Engine Construction, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: alexaur61@gmail.com.