

## ОЦІНКА КРИТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРУ ГАСІННЯ В МІКРОКАНАЛІ

А. О. Бурлака<sup>1, а</sup>, С. М. Пономаренко<sup>1</sup>

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

### Анотація

Здійснено огляд проблеми масштабування спалювання газу в каналі. Приведено результати аналітичного розрахунку критичного розміру мікроканалу, при якому відбувається затухання полум'я. Зроблено висновок про ефективність даного методу.

*Ключові слова:* мікроканал, горіння, критичний діаметр.

### Вступ

Спалювання в малих масштабах має декілька якісних відмінностей у порівнянні зі звичайним згорянням. Оскільки розмір камери згоряння зменшується, вплив міжфазних явищ (теплообмін і поверхневі реакції), що відбуваються на стінках камери згоряння, збільшується внаслідок більш високого відношення поверхні до об'єму. Виділення енергії в камері згоряння пропорційно її обсягу, а теплові втрати і поверхневі реакції пропорційні площі його поверхні. По мірі зменшення масштабу камери згоряння, відношення площі поверхні до об'єму збільшується по мірі зворотного масштабу характерної довжини.

### 1. Мікрозгоряння: характеристики та проблеми масштабування

Вплив цього характеристичного виміру на згоряння у міру зниження його значення можна зрозуміти шляхом нормалізації рівнянь збереження [1] і запису їх у термінах термофізичних безрозмірних чисел  $Re$  (число Рейнольдса),  $Pe$  (число Пекле),  $Le$  (число Льюїса) і  $Da$  (число Дамкохлера).

$$\begin{aligned} \frac{l_c}{t_c u_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} &= -\frac{p_c}{\rho_c u_c^2} \frac{1}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{Re} \bar{v} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{gl_c}{u_c^2}, \\ \frac{l_c}{t_c u_c} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= \frac{1}{Pe} \bar{\alpha} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + Da \frac{Q}{C_p T_p} \bar{w}''', \\ \frac{l_c}{t_c u_c} \frac{\partial \bar{\gamma}_i}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\gamma}_i}{\partial \bar{x}} &= \frac{1}{Le Pe} \bar{D} \frac{\partial^2 \bar{\gamma}_i}{\partial \bar{x}^2} + Da \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \bar{w}'''' \end{aligned}$$

Для звичайних масштабів довжини (макромасштаби) числа Рейнольдса і Пекле великі так як значення великі. Потoki в основному в турбулентному режимі, а в'язкі та дифузні ефекти відносно малі в порівнянні з конвективними ефектами. На відміну від дрібномасштабних потоків, в яких значення  $Re$  і  $Pe$

невеликі, так що потоки є ламінарними або перехідними. Це означає, що в системі можуть домінувати в'язкі та дифузні ефекти. Крім того, для високошвидкісних потоків, невелика характеристична довжина призводить до малого часу перебування. Це може знизити значення числа Дамкохлера до одиниці, а іноді й нижче одиниці, тим самим гасячи реакцію.

### 2. Гасіння полум'я

Гасіння полум'я визначається як припинення поширення полум'я в присутності горючих речовин. Вперше в 1817 році сер Хамфрі Деві повідомив про гасіння полум'я, коли він займався запобіганням вибухів у вугільних шахтах. Він виявив, що поширення полум'я може бути зупинено дрібною дровою сіткою. Через сто років Пайман і Віллер опублікували свої роботи по поширенню полум'я через трубки малого діаметра. У 1933 році Холм ввів концепцію відстані гасіння або діаметру гасіння на основі його експериментальних досліджень гасіння полум'я. З тих пір кілька груп дослідників провели серію досліджень з гасіння полум'я при контакті з холодною стінкою, що свідчить про те, що полум'я не може пройти через проміжки міліметрового масштабу. Концепція відстані гасіння часто використовується для розробки вибухозахисних пристроїв. У зв'язку з її важливістю в промисловому застосуванні було розроблено декілька методів оцінки відстані гасіння для поширення полум'я в різних сумішах [2].

Розроблено кілька теорій щодо гасіння стін полум'ям. Найважливіший внесок зробив Зельдович [3, 4]. У своїй теорії він показав, що число Пекле, залишається постійним на межі гасіння полум'я [5]. Число Пекле, розраховане з використанням відстані гасіння і швидкості ламінарного горіння, становить близько 39 – 41 для метану-повітря і 42 для пропану-повітря в широкому діапазоні складу сумішей [2].

Можна підсумувати, що діаметр гасіння по суті є загальним результатом багатьох факторів. Вони

<sup>а</sup>annybur45@gmail.com

включають тип реагентів, температуру стінки, матеріал стінки, тиск камери і геометрію проходу для поширення полум'я (більший діаметр гасіння для круглих труб порівняно з паралельними пластинами) Класичне визначення відстані гасіння (найменша можлива шкала довжини для спалювання) застосовується тільки для горючої суміші при тиску 1 атм і температурі стінки близько 298 К. Відстань гасіння зменшується зі збільшенням температури стінки внаслідок зменшення втрат тепла від полум'я. Так само, як тиск збільшується, діаметр гасіння зменшується. Тому можна досягти горіння всередині набагато менших масштабів, ніж передбачено класичною теорією гасіння.

### 3. Розрахунок критичного значення діаметру гасіння

Критичний діаметр гасіння полум'я  $d$  є характеристикою горючої газо- або пароповітряної суміші при певній температурі і тиску і являє собою мінімальний діаметр каналу, через який полум'я ще може поширитися необмежено. Якщо діаметр каналу для даної горючої суміші дорівнює  $d$ , то в зоні горіння встановлюється рівність між тепловиділеннями і тепловтратами. Критичний діаметр визначається розрахунком або експериментальним шляхом. Зокрема, в роботах [6, 7] пропонується розрахунок критичного діаметру на основі безрозмірних рівнянь з використанням таких величин, як адіабатична швидкість горіння та адіабатична температура полум'я. Даний метод є доволі складним для розрахунків, тому для оцінки пропонується метод розрахунку критичного діаметру гасіння полум'я в сухих вогнеперепинювачах за Кисельовим Я.С. [8]

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \lambda}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}, \quad (1)$$

$Pe$  – число Пекле;

$R$  – універсальна газова стала, Дж/кмоль·К;

$T$  – початкова температура газової суміші, К;

$\lambda$  – теплопровідність горючої суміші, Вт/(м·К);

$S_u$  – нормальна швидкість поширення полум'я, м/с;

$P$  – тиск горючої суміші, Па;

$M$  – молярна маса, кг/кмоль.

Коефіцієнт температуропровідності виражається наступною залежністю:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho},$$

Звідси можна отримати вираз для коефіцієнта теплопровідності, підставити його у вираз (1) і отримаємо формулу для розрахунків:

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \rho \cdot \alpha}{S_u \cdot P \cdot M}, \quad (2)$$

Для перевірки, підставимо у (2) параметри, які використовувались в роботі [6] та табличні значення необхідних величин:  $Pe = 40$ ;  $R = 8310$  Дж/кмоль·К;  $T = 290$  К;  $\lambda = 4 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·К);  $S_u = 0,37$  м/с;  $P = 10^5$  Па;  $M = 27,76$  кг/кмоль  $\rho = 1,15$  кг/м<sup>3</sup>.

Провівши необхідні розрахунки, отримуємо значення критичного діаметру  $4 \cdot 10^{-3}$  м, що співпадає з розрахунками [6]. Аналогічні розрахунки були проведені і для інших робіт, зокрема для [7]. Таким чином можна сказати, що дана формула є ефективним методом для оцінки критичного значення діаметру гасіння.

### Висновок

У даній статті було розглянуто проблему затухання полум'я в мікроканалі та поняття критичного діаметру гасіння полум'я. Класична відстань гасіння – це найменша можлива шкала довжини для спалювання, тому питання її оцінки є дуже важливим для подальшого розвитку газузі. Існує кілька методів розрахунку  $d_{cr}$ , проте всі вони або експериментальні, або не підходять для зручної оцінки через свою складність. В даній роботі обрховано  $d_{cr}$  методом розрахунку критичного діаметра гасіння полум'я в сухих вогнеперепинювачах за Кисельовим. Було встановлено, що при одних і тих же параметрах для метано-повітряної суміші значення  $d$ , розраховане запропонованим методом, достатньо точно і порівнянні зі значеннями, які приводяться в літературі, а отже метод придатний для проведення оцінки критичного розміру каналу.

### Перелік використаних джерел

1. Fernandez-Pello, A. C. "Micro-Power Generation using Combustion: issues and approaches" 29th Int. Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 2002, pp. 1 – 45.
2. Vijayan, V. Combustion and heat transfer in meso-scale heat recirculating combustor. 2010.
3. Зельдович, Я. Б. "Теория предела распространения тихого пламени" Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1941, pp. 159
4. Зельдович, Я. Б. "Теория взрыва и детонации газов" Академия наук СССР, Москва, 1944
5. Зельдович, Я. Б. Баренблатт, Г. И. Либрович, В. Б. "Математическая теория горения и взрыва" Из-во Наука, Москва, 1980
6. Мазурок Д. Б., Фурсенко Р. В., Минаев С. С., Луценко Н. А., Кумар С. Режимы горения предварительно перемешанной смеси газов в нагретом микроканале с плавно возрастающей по потоку газа температурой стенок – Физика горения и взрыва, 2014, Т. 50, № 1.
7. Минаев С. С., Серещенко Е. В., Фурсенко Р. В. Разделяющиеся пламена в узком канале с градиентом температуры на стенках – Физика горения и взрыва, 2009, Т. 45, № 2.
8. Киселев Я. С. Определение критических параметров гашения пламени в сухих огнепреградителях. – Научно-практический и учебно-методический журнал – М.: Новые технологии. – 56 с. – ISSN 1684-6435.