

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Тепломасообмін в водомазутних паливах

Р. О. КЛИМОВ

Дніпродзержинський державний технічний університет

В статті проведено порівняльний аналіз розрахунків по моделі зростання парової фази частки водомазутного палива, з урахуванням дії поверхнево-активних речовин на її формування, з результатами по зростанню парових бульбашок в об'ємі рідини. Вказана перспективність розробленого методу розрахунку в порівнянні з існуючими.

В статье проведен сравнительный анализ расчетов по модели роста паровой фазы частицы водомазутного топлива, с учетом действия поверхностно-активных веществ на ее формирование, с результатами по росту паровых пузырьков в объеме жидкости. Указана перспективность разработанного метода расчета по сравнению с существующими.

In the given work the comparative analysis of calculations is conducted for the models of increase of steam phase of part of water-mazut fuel, taking into account operating of surface active agent on her forming, with results on the increase of steam bubbles in the volume of liquid. The indicated perspective of the worked out method of calculation is as compared to existing.

Вступ. В даний час актуальні завдання енергозбереження при роботі енергетичних паливних установок. Для вирішення цих задач інтерес представляють водопаливні емульсії: вода - мазут, вода - бензин, вода - мазут - вугільний пил. В високов'язких мазутах спостерігається підвищений вміст води у вигляді окремих місцевих скупчень, обумовлений процесами транспортування, перекачування, зберігання і підігріву палива. Використання як палива спеціально приготованих водомазутних емульсій є одним з ефективних методів, що дозволяють усунути негативні наслідки цього явища [1]. Вміст води в мазуті в багатьох випадках істотно перевищує гранично допустимі значення, при цьому вода розміщується нерівномірно шарами в масі палива. Це призводить до зриву і загасання факелу. Підготовка мазуту до спалювання зводиться в основному до двох операцій: зневоднення і нагрівання. Заходи по осушенню мазуту випаровуванням води енергоємні і ведуть до втрати летючих компонентів палива. Зневоднення виконується в основному шляхом відстоювання. Розділення фаз мазут-вода в накопичувачах-відстійниках вимагає досить великого часу і малоефективне. При спалюванні водопаливних емульсій отримують суттєвий економічний ефект, підвищення ККД на 3-5 % і зниження емісії забруднюючих речовин в атмосферу [1].

Проведені дослідження [2-6] ставили своєю метою визначення оптимальних режимів для процесів емульгування, диспергування і гомогенізації сумішей

двох і більше взаємнонерозчинних рідин. Для цих процесів відіграють велику роль парові бульбашки і парові порожнини. Були запропоновані моделі, які описують ріст парової бульбашки в об'ємі рідини [3], на поверхнях необмеженого розміру при кипінні в умовах вільної конвекції [4] і на мікроповерхнях [5], представлена модель зростання парової бульбашки яка знаходиться в ансамблі таких ж бульбашок з урахуванням колективної їх дії на неї [6]. В деяких джерелах проведено порівняльний аналіз розрахункових і дослідних даних.

Розглядаючи роботи по динаміці росту парової бульбашки на поверхнях необмеженого розміру при кипінні в умовах вільної конвекції [4] і при кипінні рідин на мікроповерхнях [5], видно, що зростання парової бульбашки протікає в декілька етапів, при цьому фактично можна зафіксувати кінозйомкою тільки асимптотичну стадію зростання і в роботі [5] тільки вона і розглядається. Наведені формули для визначення радіуса бульбашки в будь-який момент часу мають обмежене застосування, тому що не враховують сил поверхневого натягу, інерційних сил і ін. Порівнюючи результати розрахунку по моделі [4] видно загальну узгодженість з експериментальними даними, але, як і виділяють самі автори цієї моделі, існує така область дослідних даних, яка не описується даною моделлю. З представлених графіків порівняння експериментальних даних та розрахунків за моделлю [5] можна зробити висновок про те, що розрахунок узгоджується з дослідними лише при певних значеннях коефіцієнтів C_s , що є основним обмежу-

Мат. мод. № 2 (31), 2014

ючим фактором застосування цієї моделі, оскільки для кожного конкретного дослідження росту парової бульбашки необхідно знати визначене значення цих коефіцієнтів. Загалом роботи [4, 5] показують домінуючу роль нагріву стінки на початку росту бульбашки, але в емульсіях при відділенні будь-якої з фаз бульбашки знаходиться також і в безперервному середовищі. Модель динаміки одиночної парової бульбашки [3] дозволяє проводити розрахунки росту бульбашок, що знаходяться в об'ємі нерухливої рідини, а також в потоці з урахуванням моделі деформації. Основними недоліками практично всіх розглянутих досліджень і методик є те, що вони не описують динаміку росту бульбашки при її появі. Деякі роботи допускають використання високих швидкостей зхлопування парової бульбашки для процесів дроблення рідких включень емульсійних середовищ.

Постановка завдання. У літературних джерелах практично відсутні роботи, в яких при вирішенні зазначеної задачі враховані процеси зниження поверхневого натягу при наявності поверхнево-активних речовин (ПАР). Особливістю фізичних властивостей емульсій типу вода-мазут є наявність ПАР, внаслідок чого поверхневий натяг на межі розділу фаз значно зменшується і за рівнянням

$$W_k = \frac{16\pi \cdot \sigma^3}{3(p_n - p_{ж})^2}, \quad (1)$$

робота утворення критичної парової бульбашки знижується пропорційно величині поверхневого натягу. Кількісна оцінка умов закипання емульсій, заснована на тому положенні, що граничні шари на поверхні часток включень при перегріванні рідини ініціюють її скипання, проведена в [2]. В процесі експериментальних досліджень відмічено, що вода в емульсіях скипає при великих перегрівках, що не характерно для чистих рідин. Це пояснюється тим, що в граничному шарі де є ПАР поверхневий натяг нижче, ніж в об'ємі і для утворення парової фази досить досягнення більш низьких температур. Таким чином, процес утворення нової фази ініціюється внутрішнім тепловим впливом на поверхні часток.

Математична модель нагріву водо-мазутної краплі і росту парової фази (рис. 1) при різкому зменшенні тиску в водо-мазутній системі базується на рівняннях теплопровідності для води та мазуту в сферичних координатах для $\tau > 0$

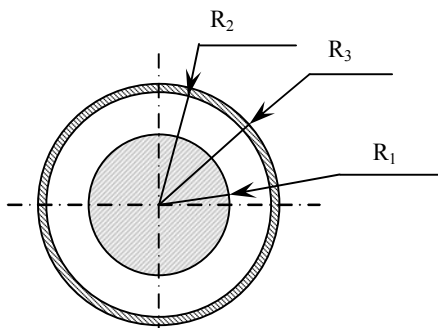


Рис. 1. До моделі нагріву водо-мазутної краплі (R_1 - радіус границі розділу вода-пара; R_2 - радіус границі розділу пара-мазут; R_3 - радіус границі розділу мазут-навколишнє середовище)

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_B \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R_1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_M \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad R_2 < r < R_3. \quad (3)$$

Початкові умови

$$t(r, 0) = t_0, \quad 0 < r < R_3. \quad (4)$$

Граничні умови

$$\begin{aligned} -\lambda_M \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_3} &= \alpha(t_n - t_3), \quad \alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_n}{d_3}, \\ -\lambda_B \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_0} &= 0, \quad t_1(\tau) = t_2(\tau) = t_s, \end{aligned} \quad (5)$$

де t_n - температура навколишнього середовища, °С; t_s - температура насичення води при даному тиску, °С.

Рівняння зміни маси пари і радіусів границь розділу для визначеного проміжку часу $\Delta\tau$

$$\Delta M = \frac{\Delta\tau}{L} \left[\frac{4\pi\lambda_M(t_3 - t_2)}{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}} - 8\pi R_1 \lambda_B (t_1 - t_{ц}) \right]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_1' &= \left(R_1^3 - \frac{3\Delta M}{4\pi\rho_B} \right)^{1/3}; \quad R_2' = \left((R_1')^3 + \frac{3\Delta M}{4\pi\rho_n} \right)^{1/3}; \\ R_3' &= \left((R_2')^3 + \frac{3V_M}{4\pi} \right)^{1/3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Критерієм закінчення розрахунку є критична товщина мазутного прошарку

$$\delta_{cr} \geq R_3' - R_2'. \quad (8)$$

Швидкості руху границь розділу

$$v_i = dR_i/d\tau, \quad i = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Матеріали та результати досліджень. Результати розрахунків за рівняннями (2-9) показані на рис. 2, 3. Порівняємо ці результати з результатами розрахунків за моделями [3-6].

Радіус R_2 , мкм

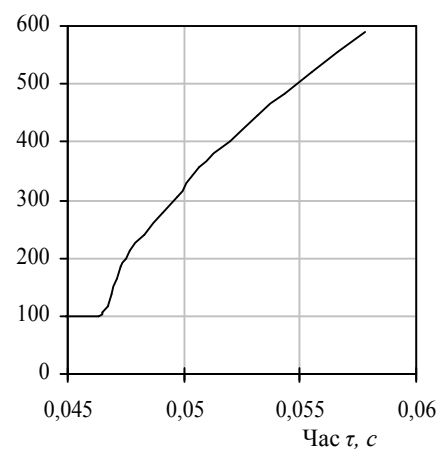


Рис. 2. Зміна радіусу R_2 для $t_n = 300$ °С

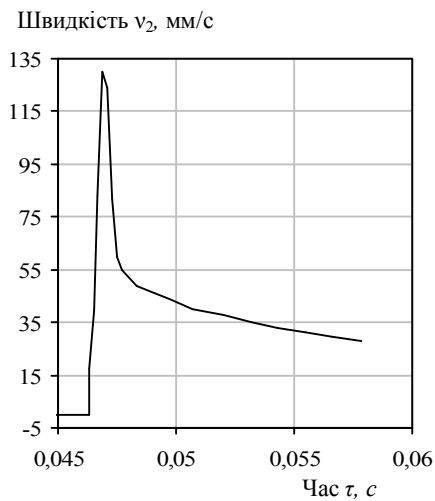


Рис. 3. Зміна швидкості v_2 для $t_n = 300$ °C

Для порівняння виберемо ізольовану бульбашку та її параметри [6] (рис. 4). З рис. 2-4 видно, що форма кривих зміни радіуса границі розділу мають практично ідентичний характер. Час необхідний для збільшення радіуса на 500 мкм за результатами [6] займає набагато менший проміжок, в результаті чого і значення швидкості росту бульбашок [6] значно вищі, ніж на рис.3. Порівнюючи результати експериментальних даних зміни радіуса парової бульбашки на рис. 4 з отриманими даними (рис. 2), видно, що характер зміни кривих $R(\tau)$ практично однаковий у всіх випадках, але кінцеві значення радіусів за експериментальними даними завжди більші, ніж розраховані за рівняннями (2-9), на однаковому проміжку часу.

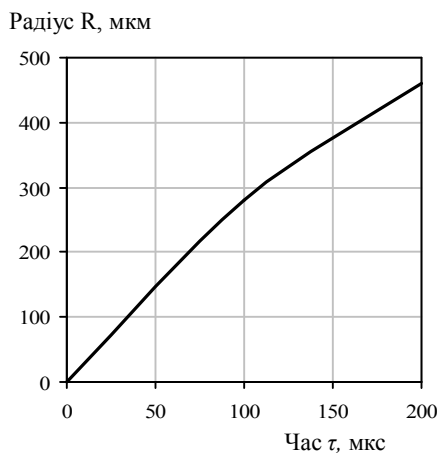


Рис. 4. Зміна радіусу зростання парового об'єму за даними [6]

Цей факт можна пояснити тим, що за моделлю (2—9) всю кількість теплоти сприймає мазутна плівка і тільки потім від плівки вона передається паровому об'єму та воді, тобто плівка відіграє роль термічного опору, як в процесі нагрівання, так і в процесі кипіння. Представлена модель дозволяє розраховувати температурне поле по перерізу краплі води мазутної плівки, як в процесі нагрівання, так і в процесі росту парової фази, що не було передбачено в усіх розглянутих вище моделях і експериментальні дані.

Висновки

Використання гомогенізованої водо-мазутної суміші дозволяє підвищити коефіцієнт спалювання палива, заощадити мазут і зменшити шкідливі викиди в атмосферу при їх спалюванні. Порівняльний аналіз різних підходів та методик розрахунку зростання парової фази показав відмітну особливість закипання води в водомазутних емульсіях. Розроблений метод розрахунку дозволяє знайти температурне поле по перетину водомазутної краплі і часовий проміжок до початку закипання води, спільно з описом росту парової фази до розриву мазутної плівки. Розрив плівки враховується її мінімальною товщиною при якій вона руйнується. Таким чином, представлена модель дозволяє описати нагрів краплі водомазутної емульсії до моменту закипання води, формування парової фази, а також її зростання, та в подальшому спрогнозувати необхідні температурні режими обробки таких середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волков А. Н. Сжигание газов и жидкого топлива в котлах малой мощности. — Л.: Недра. 1989. — 160 с.
2. Долинский А. А. Теплофизические процессы в эмульсиях / А. А. Долинский, А. М. Павленко, Б. И. Басок. — Киев. Наукова думка. 2005. — 265 с.
3. Долинский А. А. Теоретическое обоснование принципа ДИВЭ. 1. Модель динамики одиночного парового пузырька / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий // Пром. теплотехника. — 1995. — Т.17. — №5. — С. 3—29.
4. Басок Б. И. Динамика роста паровой фазы при кипении рідин в умовах вільної конвекції / Б. И. Басок, В. Л. Зав'ялов, В. Р. Кулінченко // Пром. теплотехника. — 2003. — Т. 25. — №6. — С. 34—41.
5. Кравец В. Ю. Скорость роста паровых пузырей при кипении жидкостей на микроповерхностях / В. Ю. Кравец, В. К. Щербаков // Пром. теплотехника. — 2000. — Т. 22. — № 2. — С. 5—7.
6. Долинский А. А. Теоретическое обоснование принципа ДИВЭ. 2. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий // Пром. теплотехника. — 1996. — Т.18. — №1. — С. 3—20.