

XÂY DỰNG MÔ HÌNH XÁC ĐỊNH ĐIỀU KIỆN BIÊN NHIỆT TRÊN PÍT TÔNG - XI LẠNH ĐỘNG CƠ DIESEL 4 KỲ PHUN NHIÊN LIỆU TRỰC TIẾP

Nguyễn Văn Dương^{1,*}, Phạm Xuân Phương¹, Lê Tiên Dương¹

¹Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Ngày nay, điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh có thể được xác định bằng thực nghiệm hoặc dựa trên việc tổng hợp kinh nghiệm từ các nghiên cứu trước đó. Tuy nhiên, phương pháp thực nghiệm quá phức tạp, phương pháp còn lại có độ tin cậy thấp và không đảm bảo cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh. Vì vậy, các tác giả đề xuất một mô hình kết hợp giữa phần mềm tính toán chu trình nhiệt, mô đun tính toán điều kiện biên nhiệt "BCOPC" do các tác giả thiết kế và phần mềm mô phỏng FEM để xác định điều kiện biên nhiệt tương đương trên các bề mặt pít tông - xi lanh. Mô hình sử dụng các thuật toán để mô hình hóa chuyển động tương đối giữa các chi tiết trong nhóm pít tông - xi lanh và thiết lập mối liên hệ truyền nhiệt không gián đoạn giữa môi chất công tác - pít tông - xéc măng - xi lanh - chất làm mát. Ứng dụng mô hình để tính toán điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh động cơ Paxman185, D80, 4Ch9,5/11. Kết quả cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh với độ lệch tương đối lớn nhất là 3,9% khi tính toán cho động cơ Paxman185. Như vậy, mô hình có thể được sử dụng để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh động cơ diesel 4 kỳ phun nhiên liệu trực tiếp.

Từ khóa: Truyền nhiệt; điều kiện biên; pít tông; xi lanh; xéc măng.

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình làm việc, pít tông và xi lanh động cơ diesel phải chịu nhiệt độ cao do quá trình đốt cháy hỗn hợp không khí - nhiên liệu. Đặc biệt, trong các động cơ diesel cỡ lớn, nhiệt độ đỉnh pít tông có thể lên tới 800°C [1]. Theo [2], [3], sự suy giảm độ bền và hư hỏng pít tông - xi lanh phần lớn do chúng phải làm việc dưới tải nhiệt cao trong thời gian dài. Trong những năm gần đây, việc cải tiến động cơ nhằm tăng hiệu suất và công suất lít càng làm cho pít tông - xi lanh phải làm việc trong điều kiện tải nhiệt cao hơn. Vì vậy, tăng sức bền và tuổi thọ của pít tông - xi lanh là vấn đề cấp thiết đối với các nhà sản xuất động cơ [4], [5]. Để dự đoán được sức bền và tuổi thọ pít tông - xi lanh, đầu tiên cần xác định trạng thái nhiệt độ và trạng thái ứng suất của chúng. Trong đó, công việc khó khăn và thách thức nhất đối với các nhà phát triển là xác định chính xác điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh. Kết quả xác định điều kiện biên nhiệt là yếu

* Tác giả liên hệ, email: duongnv@lqdtu.edu.vn
DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n01.908

tổ quyết định tới sự chính xác trong việc xác định trạng thái nhiệt độ và trạng thái ứng suất cơ-nhiệt của pít tông - xi lanh, tiếp đó là dự đoán sức bền và tuổi thọ các chi tiết.

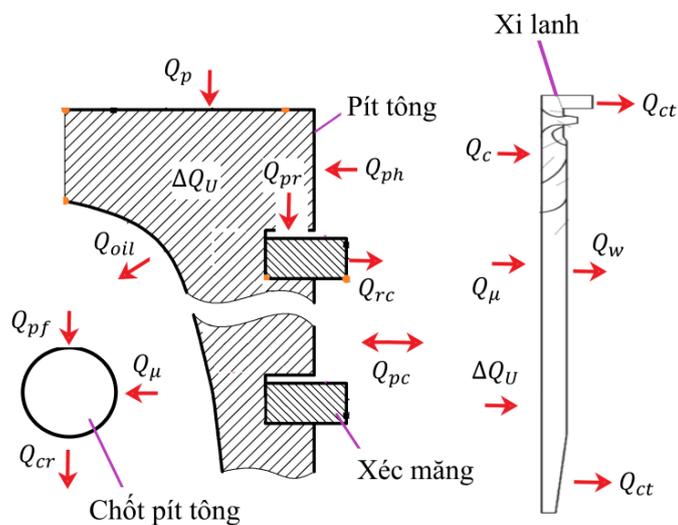
Để xác định điều kiện biên nhiệt trên bề mặt pít tông - xi lanh, các mô hình bán thực nghiệm được phát triển bởi Woschni; Hohenberg; Roselblit... và kết quả là các công thức bán thực nghiệm xác định hệ số trao đổi nhiệt giữa môi chất công tác và thành buồng đốt [6]-[8]. Các công thức này có độ tin cậy cao, tuy nhiên chúng chỉ xác định được điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt buồng đốt, điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt còn lại của pít tông - xi lanh thì chưa được đề cập tới. Phương pháp xác định điều kiện biên nhiệt bằng thực nghiệm cũng được sử dụng khá phổ biến [9], tuy nhiên phương pháp thực nghiệm cần nhiều thời gian, công sức và chi phí cao. Trong báo cáo của mình, Douglas trình bày một phương pháp xác định các điều kiện biên nhiệt trong buồng đốt của động cơ diesel thông qua phân tích nhiệt động lực học và truyền nhiệt nhưng mới chỉ áp dụng hiệu quả cho mô hình 2D [10]. O'Hara phân tích các vấn đề truyền nhiệt với gradient nhiệt bằng phương pháp phần tử hữu hạn và chỉ tập trung phân tích khả năng áp dụng FEM để giải quyết các bài toán truyền nhiệt 3 chiều [11]. Trujillo đã đề xuất một phương pháp ước tính nhiệt độ trung bình của bề mặt bên trong xi lanh của động cơ làm mát bằng không khí [12]. Các phương pháp được đề cập đến ở trên có độ phức tạp cao, khó thực hiện, đặc biệt là những phương pháp đòi hỏi phải xây dựng mô hình thực nghiệm. Một phương pháp xác định điều kiện biên nhiệt đơn giản và được sử dụng khá phổ biến là phương pháp xác định điều kiện biên nhiệt thông qua đánh giá các tài liệu và công thức kinh nghiệm [13]-[15]. Tuy nhiên, phương pháp này có độ chính xác không cao và thường không đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh.

Ngày nay, việc sử dụng phương pháp mô hình hóa để giải quyết các vấn đề truyền nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh được sử dụng khá phổ biến [16], [17]. Vấn đề thách thức khi xây dựng mô hình để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh là phải đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh, mô hình đơn giản, dễ thực hiện, có độ tin cậy nhất định và sử dụng được cho nhiều loại động cơ. Trong một báo cáo trước đó [18], dựa trên nguyên tắc bảo toàn thông lượng nhiệt truyền qua một mặt phẳng, tác giả đã đề xuất phương pháp xác định điều kiện biên nhiệt tương đương trên một bề mặt từ điều kiện biên nhiệt tức thời trên bề mặt đó và áp dụng để xác định điều kiện biên nhiệt cho pít tông - xi lanh động cơ 10D100. Tuy nhiên, mô hình truyền nhiệt cần được cải tiến để đảm bảo cân bằng năng lượng và mối liên hệ truyền nhiệt không gián đoạn trong nhóm pít tông - xi lanh, ngoài ra, có thể sử dụng để xác định điều kiện biên nhiệt cho pít tông - xi lanh của nhiều động cơ khác nhau.

Trong bài báo này, các tác giả đề xuất mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh, trong đó sử dụng kết hợp giữa phần mềm tính toán chu trình nhiệt, mô đun tính toán điều kiện biên “BCOPC” do các tác giả xây dựng và phần mềm mô phỏng FEM để mô hình hóa quá trình truyền nhiệt không gián đoạn giữa các thành phần trong nhóm pít tông - xi lanh. Việc mô hình hóa quá trình truyền nhiệt không gián đoạn trong nhóm pít tông - xi lanh sẽ đảm bảo được tính chất tương tác nhiệt giữa môi chất công tác - pít tông - xéc măng - xi lanh - các chất làm mát và đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh. Trong đó, phần mềm tính toán chu trình nhiệt sử dụng các công thức bán thực nghiệm để xác định điều kiện biên nhiệt trên bề mặt buồng đốt theo góc quay trục khuỷu (điều kiện biên nhiệt tức thời) và thông lượng nhiệt trao đổi trên bề mặt buồng đốt. Trong khi mô đun tính toán điều kiện biên “BCOPC” và phần mềm mô phỏng FEM để giải quyết các vấn đề truyền nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh.

2. Cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh

Để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh, đầu tiên cần xác định được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh. Dựa vào nguyên lý làm việc của động cơ đốt trong, đặc điểm kết cấu nhóm pít tông - xi lanh và các phân tích trong báo cáo trước đó của tác giả bài báo này [18], [19], mô hình tương tác nhiệt giữa các chi tiết trong nhóm pít tông - xi lanh và giữa các chi tiết trong nhóm pít tông - xi lanh với môi trường bên ngoài, bao gồm môi chất công tác và chất làm mát được xác định như Hình 1.



Hình 1. Cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh.

Trong Hình 1: Q_p - nhiệt lượng từ môi chất công tác truyền vào bề mặt đỉnh pít tông, [kW]; Q_{ph} - nhiệt lượng từ môi chất công tác truyền vào bề mặt bên của đầu pít tông, [kW]; Q_μ - nhiệt lượng sinh ra do ma sát, [kW]; Q_c - nhiệt lượng từ môi chất công tác truyền vào bề mặt trong của xi lanh, [kW]; ΔQ_U - nhiệt lượng dùng để tăng nhiệt độ các chi tiết, [kW]; Q_{pr} - nhiệt lượng từ pít tông truyền vào xéc măng, [kW]; Q_{rc} - nhiệt lượng từ xéc măng truyền vào xi lanh, [kW]; Q_{pc} - nhiệt lượng trao đổi giữa

mặt ngoài của thân pít tông với thành xi lanh và dầu bôi trơn, [kW]; Q_{pf} - nhiệt lượng từ pít tông truyền vào chốt pít tông, [kW]; Q_{oil} - nhiệt lượng từ mặt trong pít tông truyền vào dầu bôi trơn, [kW]; Q_{cr} - nhiệt lượng từ chốt pít tông truyền vào thanh truyền, [kW]; Q_w - nhiệt lượng truyền vào chất làm mát, [kW]; Q_{ct} - nhiệt lượng từ xi lanh truyền vào block xi lanh, dầu bôi trơn và khí các te, [kW].

Cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh được xác định như sau:

$$Q_p + Q_\mu + Q_c + Q_{ph} = \Delta Q_U + Q_{oil} + Q_{cr} + Q_w + Q_{ct} \quad (1)$$

trong đó, tổng nhiệt lượng nhận được từ môi chất công tác và nhiệt lượng sinh ra do ma sát bằng với tổng nhiệt lượng truyền cho môi trường bên ngoài và nhiệt lượng để tăng nhiệt độ các chi tiết trong nhóm pít tông - xi lanh.

Tương tự, cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông và cân bằng năng lượng trên xi lanh được xác định theo công thức (2) và (3).

Cân bằng năng lượng trên nhóm pít tông (bao gồm pít tông, chốt pít tông và xéc măng), được xác định theo công thức sau:

$$Q_p + Q_\mu + Q_{ph} = \Delta Q_U + Q_{oil} + Q_{rc} + Q_{pc} + Q_{cr} \quad (2)$$

trong đó, tổng nhiệt lượng được hấp thụ từ môi chất công tác và nhiệt lượng sinh ra do ma sát bằng với tổng nhiệt lượng truyền cho xi lanh, dầu làm mát, thanh truyền và để tăng nhiệt độ các chi tiết.

Cân bằng năng lượng trên xi lanh được xác định theo công thức sau:

$$Q_c + Q_\mu + Q_{pc} + Q_{rc} = \Delta Q_U + Q_w + Q_{ct} \quad (3)$$

trong đó, tổng nhiệt lượng được hấp thụ từ môi chất công tác, từ xéc măng, từ thành pít tông và nhiệt lượng sinh ra do ma sát bằng với tổng nhiệt lượng truyền cho chất làm mát, block xi lanh, dầu bôi trơn, khí các te và để tăng nhiệt độ các chi tiết.

3. Xây dựng mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên pít tông - xi lanh

3.1. Giả thiết

Để đơn giản hóa quá trình tính toán, các tác giả vận dụng các giả thiết sau:

- Nhiệt độ và hệ số truyền nhiệt giữa khí cháy và bề mặt buồng đốt là đồng nhất trên toàn bộ bề mặt buồng đốt;

- Không xét đến nhiệt lượng sinh ra do ma sát và trao đổi nhiệt giữa chốt pít tông và thanh truyền;

3.2. Mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh

Theo các phân tích ở Phần 2, tính chất truyền nhiệt trên các bề mặt và theo giả thiết đặt ra thì quá trình trao đổi nhiệt trên một số bề mặt của pít tông, xi lanh và hệ số

truyền nhiệt giữa xéc măng và xi lanh có thể được xác định theo các nghiên cứu đã được công bố. Trong đó:

- Hệ số trao đổi nhiệt giữa xéc măng và thành xi lanh được xác định theo [20];
- Quá trình truyền nhiệt giữa bề mặt ngoài của xi lanh với nước làm mát và block xi lanh được xác định theo [8];
- Quá trình truyền nhiệt giữa bề mặt trong của pít tông với dầu bôi trơn được xác định theo [8];
- Mặt bên của phần đầu pít tông chỉ trao đổi nhiệt với khí cháy và được xác định theo [15];
- Bề mặt ngoài của thân pít tông thường có nhiệt độ xấp xỉ bằng nhiệt độ trung bình trên bề mặt trong của xi lanh, ngoài ra, phần lớn bề mặt được ngăn cách với xi lanh bằng dầu bôi trơn, vì vậy, coi như bề mặt ngoài phần thân pít tông không trao đổi nhiệt với thành xi lanh. Quá trình truyền nhiệt ở bề mặt này được xác định theo [15].

Như vậy, các bề mặt cần xác định điều kiện biên trên nhóm pít tông - xi lanh bao gồm: bề mặt đỉnh pít tông, các bề mặt lưng xéc măng và bề mặt trong của xi lanh.

Theo chuyển động của pít tông, xéc măng trong xi lanh, diện tích trao đổi nhiệt giữa môi chất công tác với xi lanh và vị trí trao đổi nhiệt giữa xéc măng với xi lanh phụ thuộc vào chuyển động của pít tông. Đây là thách thức lớn khi mô hình hóa mô hình truyền nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh.

Để mô hình hóa quá trình truyền nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh và mô phỏng chuyển động tương đối giữa pít tông - xéc măng - xi lanh, các tác giả sử dụng mô hình kết hợp giữa phần mềm tính toán chu trình nhiệt, mô đun tính toán điều kiện biên "BCOPEC" và phần mềm mô phỏng FEM như trong Hình 2a.

Phương pháp xác định điều kiện biên trên các bề mặt pít tông - xi lanh như sau:

Phần mềm tính toán chu trình nhiệt (block 1), có thể sử dụng các phần mềm chuyên dụng như RK-Diesel, GT-suite... hoặc các thuật toán tính toán chu trình nhiệt do người sử dụng tự thiết lập và các công thức bán thực nghiệm để xác định điều kiện biên nhiệt tức thời trên các bề mặt buồng đốt α_i, T_i (block 3). Thông số đầu vào bao gồm các thông số động cơ cần thiết và nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh pít tông ($\overline{T_p}$), nhiệt độ trung bình trên bề mặt trong của xi lanh ($\overline{T_C}$), được giới hạn từ điểm A đến điểm C trên Hình 2c. $\overline{T_p}, \overline{T_C}$ do người dùng tự chọn với giá trị bất kỳ (block 2).

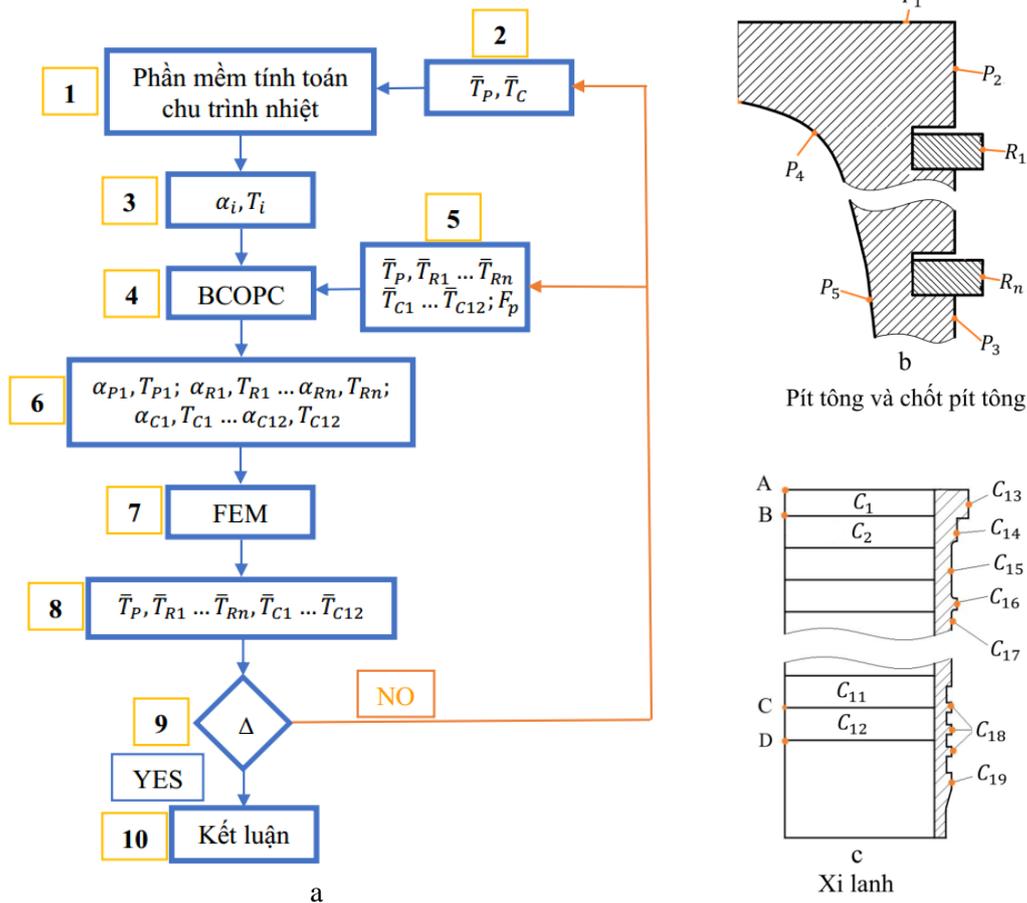
Tại block 4, sử dụng mô đun BCOPEC - mô đun do các tác giả xây dựng và thiết lập để xác định điều kiện biên tương đương trên các bề mặt pít tông - xi lanh. Thông số đầu vào cho mô đun bao gồm: diện tích bề mặt đỉnh pít tông F_p , nhiệt độ trung bình bề

mặt đỉnh pít tông $\overline{T_p}$; các nhiệt độ $\overline{T_{R_1}} \dots \overline{T_{R_n}}$ tương ứng với nhiệt độ trung bình trên bề mặt lưng các xéc măng $R_1 \dots R_n$; các nhiệt độ $\overline{T_{C_1}} \dots \overline{T_{C_{12}}}$ tương ứng với nhiệt độ trung bình trên các bề mặt từ $C_1 \dots C_{12}$ trên xi lanh; điều kiện biên nhiệt tức thời trên bề mặt buồng đốt α_i, T_i . Các nhiệt độ $\overline{T_p}, \overline{T_{R_1}} \dots \overline{T_{R_n}}, \overline{T_{C_1}} \dots \overline{T_{C_{12}}}$ (block 5) do người dùng tự chọn. Trong mô đun BCOPC, các tác giả thiết lập các thuật toán để mô hình hóa chuyển động tương đối giữa pít tông, xéc măng và xi lanh, từ đó xác định các phạm vi trao đổi nhiệt giữa môi chất công tác với thành xi lanh và vị trí trao đổi nhiệt giữa xéc măng với thành xi lanh tại từng thời điểm theo góc quay trục khuỷu. Từ kết quả mô hình hóa chuyển động của pít tông, xéc măng và xi lanh, kết hợp với các thông số đầu vào, mô đun BCOPC sẽ xác định điều kiện biên nhiệt tức thời trên các bề mặt $R_1 \dots R_n$ trên xéc măng và các bề mặt $C_1 \dots C_{12}$ trên xi lanh.

Trên Hình 2, $P_1 \dots P_5$ tương ứng với bề mặt đỉnh pít tông, bề mặt bên của đầu pít tông, mặt bên của thân pít tông, bề mặt dưới của đỉnh pít tông, bề mặt trong của thân pít tông; $R_1 \dots R_n$ - bề mặt lưng của các xéc măng từ 1 tới “n” ở phần đầu pít tông (R_n - xéc măng dưới cùng ở trên phần đầu pít tông); các bề mặt $C_1 \dots C_{19}$ tương ứng với các bề mặt xi lanh; các điểm A, B, C, D tương ứng với điểm trên cùng của xi lanh, điểm chết trên, điểm chết dưới của pít tông và vị trí của xéc măng “n” khi pít tông ở điểm chết dưới. Từ kết quả xác định điều kiện biên nhiệt tức thời, dựa trên nguyên tắc bảo toàn thông lượng nhiệt truyền qua một mặt phẳng, các tác giả sử dụng công thức xác định điều kiện biên nhiệt tương đương đã được công bố trong báo cáo trước đó của các tác giả để tính toán điều kiện biên tương đương trên các bề mặt $P_1, R_1 \dots R_n, C_1 \dots C_{12}$ trên pít tông, xéc măng và xi lanh [18]. Kết quả nhận được từ mô đun BCOPC bao gồm các điều kiện biên $\alpha_{P_1}, T_{P_1}; \alpha_{R_1}, T_{R_1}; \dots; \alpha_{R_n}, T_{R_n}; \alpha_{C_1}, T_{C_1}; \dots; \alpha_{C_{12}}, T_{C_{12}}$ (block 6) tương ứng với các bề mặt $P_1, R_1 \dots R_n, C_1 \dots C_{12}$.

Từ kết quả điều kiện biên thu được ở block 6, sử dụng mô hình 2b và 2c để xác định trạng thái nhiệt độ của nhóm pít tông - xi lanh trong FEM (block 7). Có thể sử dụng các phần mềm mô phỏng như Ansys, SolidWorks, StarCCM, AutoCAD... Từ kết quả xác định trạng thái nhiệt của nhóm pít tông - xi lanh trong FEM, xác định nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh pít tông $\overline{T'_p}$, bề mặt lưng xéc măng $\overline{T'_{R_1}} \dots \overline{T'_{R_n}}$, bề mặt trong xi lanh $\overline{T'_{C_1}} \dots \overline{T'_{C_n}}$ (block 8). Trong block 9, so sánh các nhiệt độ $\overline{T'_p}, \overline{T'_{R_1}} \dots \overline{T'_{R_n}}, \overline{T'_{C_1}} \dots \overline{T'_{C_n}}$ nhận được từ FEM với các nhiệt độ $\overline{T_p}, \overline{T_{R_1}} \dots \overline{T_{R_n}}, \overline{T_{C_1}} \dots \overline{T_{C_{12}}}$ đã chọn ở trên (block 2 và block 5), nếu kết quả

khác nhau thì điều chỉnh lại nhiệt độ đầu vào $\bar{T}_P, \bar{T}_{R1} \dots \bar{T}_{Rn}, \bar{T}_{C1} \dots \bar{T}_{C12}$ và tính toán lại từ đầu. Nếu nhiệt độ $\bar{T}'_P, \bar{T}'_{R1} \dots \bar{T}'_{Rn}, \bar{T}'_{C1} \dots \bar{T}'_{Cn}$ nhận được từ FEM có giá trị tương đương với các nhiệt độ $\bar{T}_P, \bar{T}_{R1} \dots \bar{T}_{Rn}, \bar{T}_{C1} \dots \bar{T}_{C12}$ với độ lệch tương đối giữa 2 giá trị nhỏ hơn 5%, tức là cân bằng nhiệt trong nhóm pit tông - xi lanh và thông lượng nhiệt trao đổi qua các bề mặt được đảm bảo, kết quả tính toán điều kiện biên nhiệt là chính xác và kết thúc quá trình (block 10).



Hình 2. Mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt

- a) Sơ đồ mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pit tông - xi lanh;
- b) Mô hình pit tông trong FEM;
- c) Mô hình xi lanh trong FEM.

3.3. Các yêu cầu đối với mô hình

- Yêu cầu 1: Cần đảm bảo nhiệt lượng trao đổi trên các bề mặt được tính toán trong mô đun BCOPC phải bằng với khi tính toán trong FEM.

- *Yêu cầu 2:* Bởi vì trong FEM, mô hình nhóm pít tông - xi lanh bao gồm 2 mô hình riêng biệt như Hình 2b và 2c, nên để đảm bảo cân bằng năng lượng và sự liên kết giữa 2 mô hình pít tông và xi lanh thì tổng nhiệt lượng từ xéc măng và môi chất công tác truyền đến bề mặt xi lanh theo tính toán trong mô đun BCOPC phải bằng tổng nhiệt lượng hấp thụ bởi bề mặt trong của xi lanh theo tính toán trong FEM.

- *Yêu cầu 3:* Cần đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh đối với mô hình FEM.

4. Kết quả và bàn luận

Tác giả sử dụng mô hình để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh và kiểm chứng cân bằng năng lượng trên nhóm pít tông - xi lanh đối với động cơ Paxman185, D80, 4Ch9,5/11 ở chế độ công suất định mức. Vật liệu của các chi tiết trong nhóm pít tông - xi lanh được các tác giả lựa chọn theo thông số của các nhà sản xuất động cơ. Kết quả tính toán chu trình nhiệt được kiểm chứng với các thông số kỹ thuật của các động cơ Paxman185, D80, 4Ch9,5/11 ở chế độ công suất định mức do nhà sản xuất cung cấp. Kết quả kiểm chứng mô hình và cân bằng năng lượng được thể hiện trong Phần 4.1, kết quả xác định điều kiện biên nhiệt được thể hiện trong Phần 4.2.

4.1. Kiểm chứng cân bằng năng lượng của mô hình

Kết quả tính toán nhiệt lượng trao đổi trên các bề mặt pít tông - xi lanh trong mô đun BCOPC và trong FEM được thể hiện trong Bảng 1 (theo yêu cầu 1). Kết quả kiểm chứng tính liên kết giữa 2 mô hình trong FEM (theo yêu cầu 2) được thể hiện trong Bảng 2. Kết quả kiểm chứng cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh (theo yêu cầu 3) được thể hiện trong Bảng 3, 4.

Trong Bảng 1: Các bề mặt $P_1, R_1 \dots R_n, C_1 \dots C_{12}$ tương ứng với các bề mặt trên pít tông - xi lanh như Hình 2b và 2c; Δ - độ lệch tương đối giữa tính toán trong BCOPC và trong FEM.

Trong Bảng 2: Q_C, Q_K - nhiệt lượng do khí cháy và xéc măng truyền đến bề mặt trong của xi lanh theo tính toán trong mô đun BCOPC, [kW]; Q'_C - tổng nhiệt lượng truyền đến bề mặt trong của xi lanh theo tính toán trong FEM, [kW]; Δ - độ lệch tương đối giữa tính toán trong BCOPC và trong FEM.

Kết quả trong Bảng 1 cho thấy rằng, nhiệt lượng trao đổi trên các bề mặt pít tông - xi lanh được tính toán trong mô đun BCOPC và trong FEM có giá trị tương đương nhau. Như vậy, mô hình đảm bảo được yêu cầu bảo toàn thông lượng nhiệt giữa việc tính toán điều kiện biên bằng mô đun BCOPC và khi áp dụng các điều kiện biên đó vào mô hình

FEM. Hầu hết các độ lệch tương đối đều rất nhỏ, độ lệch tương đối lớn nhất là 5,76% khi tính toán điều kiện biên cho bề mặt C₄ đối với động cơ 4Ch9,5/11.

Bảng 1. So sánh kết quả tính toán nhiệt lượng trao đổi trên các bề mặt pitt tông - xi lanh theo tính toán giữa mô đun BCOPC và FEM

Bề mặt	Paxman185			D80			4Ch9,5/11		
	BCOPC, [kW]	FEM, [kW]	Δ , %	BCOPC, [kW]	FEM, [kW]	Δ , %	BCOPC, [kW]	FEM, [kW]	Δ , %
P ₁	12,24	12,26	-0,12	15,14	15,13	0,07	1,275	1,27	0,42
R ₁	-1,67	-1,68	0,5	1,34	-1,35	0,73	-0,4875	-0,49	0,87
R ₂	-0,418	-0,414	-0,91	0,44	-0,445	0,81	-0,3	-0,305	1,65
R ₃	-0,223	-0,23	2,99	0,358	-0,364	1,64	-0,215	-0,21	1,23
R ₄	-	-	-	0,767	-0,768	0,21	-0,0625	-0,063	0,9
C ₁	5,57	5,58	-0,19	5,49	5,48	0,186	0,335	0,337	0,38
C ₂	5,21	5,2	0,22	4,61	4,6	0,19	0,25	0,24	4,0
C ₃	3,52	3,5	0,54	2,67	2,671	-0,12	0,164	0,165	0,7
C ₄	2,89	2,88	0,48	1,98	1,97	0,79	0,19	0,20	5,67
C ₅	2,61	2,6	0,50	1,67	1,66	0,31	0,14	0,139	0,223
C ₆	2,31	2,30	0,23	1,425	1,42	0,34	0,119	0,1198	0,86
C ₇	2,02	2,01	0,26	1,225	1,227	-0,146	0,108	0,1074	0,044
C ₈	1,756	1,75	0,48	1,067	1,068	-0,106	0,0987	0,0988	0,04
C ₉	1,53	1,51	1,14	0,925	0,926	-0,015	0,0951	0,095	0,064
C ₁₀	1,3	1,29	1,16	0,792	0,778	1,76	0,094	0,0944	0,67
C ₁₁	1,01	0,996	1,23	0,608	0,604	0,636	0,095	0,094	1,29
C ₁₂	1,49	1,475	0,85	0,79	0,81	-2,08	0,3125	0,31	0,84

Bảng 2. Kết quả kiểm chứng mô hình theo yêu cầu 2

Động cơ	Q _c , [kW]	Q _K , [kW]	Q _{c'} , [kW]	Δ , %
Paxman185	28,91	2,32	31,1	0,39
D80	21,5	2,91	23,2	5,3
4Ch9,5/11	1,015	1,06	2,01	3,23

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy tổng nhiệt lượng do khí cháy và xéc măng truyền đến bề mặt xi lanh (theo tính toán bằng BCOPC) tương đương với tổng nhiệt lượng do xi lanh hấp thụ (theo tính toán bằng FEM). Độ lệch tương đối giữa 2 giá trị rất nhỏ, độ lệch lớn nhất là 5,3%, khi tính toán cho động cơ D80. Đáp ứng được yêu cầu 1 và yêu cầu 2, tức là mô hình đã tạo được sự liên kết giữa 2 mô hình pitt tông và xi lanh trong FEM.

Bảng 3. Cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh (theo công thức 1)

Động cơ	Q_p , [kW]	Q_{ph} , [kW]	Q_c , [kW]	Q_{oil} , [kW]	Q_{PC} , [kW]	Q_w , [kW]	Q_{ct} , [kW]	Q_{in} , [kW]	Q_{out} , [kW]	Δ , %
Paxman185	12,3	0,55	28,8	-10	-0,43	-24,7	-8,2	41,6	-43,2	3,9
D80	15,1	1,11	20,3	-12,3	-0,95	-18,4	-5,21	36,5	-36,9	0,9
4Ch9,5/11	1,27	0,14	0,93	-0,08	-0,16	-1,9	-0,18	2,34	-2,31	-1,12

Trong Bảng 3: Q_{in} - tổng nhiệt lượng truyền đến các bề mặt pít tông - xi lanh, [Kw]; Q_{out} - tổng nhiệt lượng thoát ra ngoài môi trường từ các bề mặt trong nhóm pít tông - xi lanh, [Kw]; Δ - độ lệch tương đối giữa tổng nhiệt lượng vào và ra trong nhóm pít tông - xi lanh.

Kết quả trong Bảng 3, 4 cho thấy mô hình đã đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh (theo tính toán bằng FEM). Độ lệch tương đối lớn nhất là 3,9% khi tính toán cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh cho động cơ Paxman185. Kết quả cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông cho độ lệch tương đối lớn nhất là 7,7% khi tính toán cho động cơ 4Ch9,5/11.

Bảng 4. Cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông (theo công thức 2)

Động cơ	Q_p , [%]	Q_{ph} , [%]	Q_{oil} , [%]	Q_{rc} , [%]	Q_{pc} , [%]	Q_{p-in} , [kW]	Q_{p-out} , [kW]	Δ , [%]
Paxman185	95,7	4,3	-78,3	-18,3	-3,4	12,8	-12,7	-0,6
D80	93,1	6,9	-76,1	-18,1	-5,8	16,2	-16,21	-0,23
4Ch9,5/11	90,2	9,8	-5,9	-81,8	-12,3	1,41	-1,31	-7,7

Trong Bảng 4: Q_{p-in} - tổng nhiệt lượng truyền đến các bề mặt nhóm pít tông, [Kw]; Q_{p-out} - tổng nhiệt lượng thoát ra ngoài môi trường từ các bề mặt trong nhóm pít tông, [Kw]; Δ - độ lệch tương đối giữa tổng nhiệt lượng vào và ra trong nhóm pít tông.

Trong quá trình tính toán và hiệu chỉnh mô hình, nhận thấy rằng độ chính xác của phép tính phụ thuộc khá lớn vào độ chính xác trong quá trình đo/xác định giá trị nhiệt độ trung bình trên các bề mặt trong FEM và sự làm tròn số trong tính toán. Ngoài ra, trạng thái nhiệt độ trên các chi tiết phân bố không đồng đều, vì vậy, để tăng độ chính xác của phép tính, cần chia bề mặt thành nhiều phần nhỏ, đặc biệt là bề mặt đỉnh pít tông và bề mặt xi lanh.

Mô hình kết hợp giữa phần mềm tính toán chu trình nhiệt, BCOPC và FEM đã đáp ứng được tất cả các yêu cầu theo giả thiết đặt ra. Mô hình đã tạo được sự liên kết giữa mô hình pít tông và mô hình xi lanh trong FEM, khi đáp ứng được yêu cầu 1 và 2. Ngoài ra, trong phần mềm tính toán chu trình nhiệt, nhiệt độ bề mặt đỉnh pít tông và

hiệu chỉnh nhiệt độ bề mặt đỉnh pít tông, xi lanh cũng ảnh hưởng đến các thông số chu trình nhiệt của động cơ. Như vậy, mô hình đã thiết lập được mối liên hệ truyền nhiệt không gián đoạn giữa môi chất công tác - pít tông - xéc măng - xi lanh - chất làm mát.

4.2. Kết quả xác định điều kiện biên

Kết quả xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh (theo các bề mặt trên Hình 2b và 2c) được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh

Bề mặt	Paxman185		D80		4Ch9,5/11	
	α , [w/m ² .K]	T, [K]	α , [w/m ² .K]	T, [K]	α , [w/m ² .K]	T, [K]
P_1	1536	1049	575	1068	232	1192
R_1	25000	404	25000	358	25000	349,5
R_2	17000	399	17000	356	17000	348,4
R_3	12000	396	12000	355	12000	347,7
R_4	-	-	7000	353	7000	346
C_1	1536	1049	575	1068	232	1192
C_2	1069	999	390	978	138	927
C_3	2111	606	994	501	1093	406
C_4	2242	544	1833	415	1616	389
C_5	1637	555	1196	425	1092	388
C_6	1385	550	994	424	913	388
C_7	1260	537	912	418	840	386
C_8	1181	521	867	411	814	384
C_9	1144	502	865	402	827	381
C_{10}	1142	480	900	391	872	379
C_{11}	1201	449	979	378	986	376
C_{12}	1618	414	1508	364	1484	373

5. Kết luận

Mô hình kết hợp giữa phần mềm tính toán chu trình nhiệt, BCOPC và FEM đã mô hình hóa được chuyển động tương đối của pít tông, xéc măng và xi lanh, từ đó xác định quá trình trao đổi nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh theo từng thời điểm và xác định điều kiện biên tương đương trên các bề mặt pít tông - xi lanh. Mô hình đảm bảo được cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh và các yêu cầu theo giả thiết đặt ra. Mô hình đã được ứng dụng để tính toán điều kiện biên nhiệt cho nhóm pít tông - xi lanh

cho các động cơ Paxman185, D80, 4Ch9,5/11. Kết quả tính toán với các độ lệch tương đối trong phạm vi cho phép. Độ lệch tương đối lớn nhất là 3,9% khi tính toán cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông - xi lanh cho động cơ Paxman185. Kết quả cân bằng năng lượng trong nhóm pít tông cho độ lệch tương đối lớn nhất là 7,7% khi tính toán cho động cơ 4Ch9,5/11. Độ lệch tương đối phần lớn phụ thuộc vào độ chính xác trong quá trình đo/xác định các thông số nhiệt độ trong FEM và sự làm tròn số trong tính toán. Như vậy, mô hình có thể được sử dụng để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông - xi lanh động cơ diesel 4 kỳ phun nhiên liệu trực tiếp.

Ngoài ra, mô hình đã thiết lập được quá trình truyền nhiệt không gián đoạn giữa môi chất công tác - pít tông - xéc măng - xi lanh - chất làm mát. Mô hình có thể được sử dụng để nghiên cứu lý thuyết về ảnh hưởng của các thông số trong nhóm pít tông - xi lanh, hiệu suất làm mát tới chu trình nhiệt của động cơ và ngược lại, ảnh hưởng của chu trình nhiệt tới trạng thái nhiệt độ của nhóm pít tông - xi lanh và hệ thống làm mát.

Lời cảm ơn

Bài báo là sản phẩm của đề tài thường xuyên cấp cơ sở của Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn mã số 24.1.68.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. B. Белогуб, В. З. Нгуен, О. Ю. Линьков, и С. А. Кравченко, "Разработка конструкции «легкого» поршня для дизелей типа Д100", *Двигатели Внутреннего Сгорания*, No. 1, pp. 50-55, 2016. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.10
- [2] F. Silva, "Fatigue on engine pistons - A compendium of case studies", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 3, pp. 480-492, 2006. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.023
- [3] F. Szymtka, M. Salem, F. Rezai-Aria, and A. Oudin, "Thermal fatigue analysis of automotive diesel piston: Experimental procedure and numerical protocol", *International Journal of Fatigue*, Vol. 73, pp. 48-57, 2015. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.11.011
- [4] A. Jankowski and M. Kowalski, "Design of a new alloy for internal combustion engines pistons", in *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Albufeira, Portugal, 2017, pp. 607-618.
- [5] N. V. Dương, "Nghiên cứu phương án cải tiến kết cấu nhằm giảm tải trọng cơ, nhiệt của pít tông động cơ diesel 10D100", *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, Vol. 19, No. 02, tr. 36-48, 2024. DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v19.n02.788
- [6] G. Woschni, "A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine", *SAE Technical Paper 670931*, p. 19, 1967. DOI: 10.4271/670931

- [7] G. F. Hohenberg, "Advanced approaches for heat transfer calculations", *SAE Technical Paper 790825*, p. 19, 1979. DOI: 10.4271/790825
- [8] Г. Б. Розенбит, *Теплопередача в дизелях*. Москва: Машиностроение, 1977.
- [9] Y. Liu, J. Lei, D. Wang *et al.*, "Experimental and simulation study on heat transfer characteristics of aluminium alloy piston under transition conditions", *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, p. 17, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-13357-0
- [10] D. M. Baker and D. Assanis, "A methodology for coupled thermodynamic and heat transfer analysis of a diesel engine", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 18, No. 11, pp. 590-601, 1994. DOI: 10.1016/0307-904X(94)90317-4
- [11] P. O'Hara, C. Duarte, and T. Eason, "Generalized finite element analysis of three-dimensional heat transfer problems exhibiting sharp thermal gradients", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, Vol. 198, No. 21-26, pp. 1857-1871, 2009. DOI: 10.1016/j.cma.2008.12.024
- [12] E. C. Trujillo, F. J. Jiménez-Espadafor, J. A. B. Villanueva, and M. T. García, "Methodology for the estimation of cylinder inner surface temperature in an air-cooled engine", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 8-9, pp. 1474-1481, 2011. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.025
- [13] K. Mahajan and S. Deshmukh, "Structural and thermal analysis of piston", *International Journal of Current Engineering Technology*, Vol. 5, pp. 22-29, 2016. DOI: 10.14741/Ijcet/22774106/sp1.5.6.2016.5
- [14] Г. В. Ломакин и М. А. Мацулевич, "Методика оценки граничных условий при решении задачи определения теплового состояния поршня бензинового двигателя", *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*, Vol. 14, No. 1, pp. 26-31, 2014.
- [15] Đ. T. Thắng, *Tính toán sức bền các chi tiết của động cơ đốt trong bằng phương pháp phần tử hữu hạn*. Nxb Quân đội Nhân dân, 2016, p. 164.
- [16] Y. Zhang, Y. Yan, R. Yang *et al.*, "Study of in-cylinder heat transfer boundary conditions for diesel engines under variable altitudes based on the CHT model", *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, p. 12, 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.828215
- [17] X. Liu, D. Cheng, J. Zhou, Q. Zheng, and X. Mi, "Fluid-structure interaction heat transfer of piston with consideration of oil oscillating cooling and in-cylinder local heat transfer", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 61, pp. 973-978, 2017. DOI: 10.3303/CET1761160
- [18] N. V. Duong and P. X. Pham, "Determining thermal equivalent boundary conditions for piston surfaces", *Transport and Communications Science Journal*, No. Special issue, pp. 452-464, 2023.

- [19] N. V. Duong and O. V. Bilohub, "Determination of boundary conditions for calculation thermo stressed condition of piston", *Aerospace Technic and Technology*, Vol. 1, pp. 39-47, 2019. DOI: 10.32620/akt.2019.1.04
- [20] Ф. Б. Барченко, "Расчет коэффициента теплоотдачи от поршневого кольца к втулке цилиндра", *Известия высших учебных заведений*, Vol. 10, pp. 3-9, 2017. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-10-3-9

DEVELOPING A MODEL TO DETERMINE THERMAL BOUNDARY CONDITIONS ON PISTON-CYLINDER OF 4-STROKE DIRECT-INJECTION DIESEL ENGINES

Abstract: *Nowadays, thermal boundary conditions on piston-cylinder surfaces can be determined experimentally or based on the synthesis of experience from previous studies. However, the experimental method is too complicated, the remaining method has low reliability and does not ensure energy balance in the piston-cylinder group. Therefore, the author proposes a model combining thermal cycle calculation software, the thermal boundary condition calculation module "BCOPC" designed by the author and FEM simulation software to determine equivalent thermal boundary conditions on piston-cylinder surfaces. The model uses algorithms to model the relative motion between the details in the piston-cylinder group and establishes an uninterrupted heat transfer relationship between the working medium - piston - piston ring - cylinder - coolant. The model is applied to calculate the thermal boundary conditions on the piston-cylinder surfaces of Paxman185, D80, 4Ch9.5/11 engines. The energy balance results in the piston-cylinder group with the largest relative deviation of 3.9% when calculating for the Paxman185 engine. Thus, the model can be used to determine the thermal boundary conditions on the piston-cylinder surfaces of 4-stroke direct-injection diesel engines.*

Keywords: Heat transfer; boundary conditions; piston; cylinder; piston ring.

Nhận bài: 25/11/2024; Hoàn thiện sau phản biện: 11/02/2025; Duyệt đăng: 28/02/2025

