

# MÔ HÌNH TÍNH TOÁN DAO ĐỘNG NHIỆT ĐỘ TƯỜNG LÒ QUAY XI MĂNG

## MODELLING OF TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN THE WALL OF CEMENT ROTARY KILN

Nguyễn Đăng Khoát<sup>1,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.44>

### TÓM TẮT

Trên cơ sở phân tích các quá trình truyền nhiệt của tường lò quay, tiến hành xây dựng mô hình toán học xác định dao động nhiệt độ của tường lò. Kết quả thu được không chỉ làm cơ sở tính toán tổn thất nhiệt qua tường mà còn là cơ sở để tính toán, lựa chọn vật liệu làm tường phù hợp với điều kiện làm việc của các lò quay xi măng.

**Từ khóa:** Lò quay, tường lò quay, dao động nhiệt độ.

### ABSTRACT

Base on analyzing heat transfer processes of the rotary kiln wall, taking process to build a mathematical model to determine the temperature fluctuations of the wall. The obtained results not only as the basis for calculating heat loss through the wall but also a basis for calculating and selecting materials wall which are suitable for working conditions of cement rotary kiln.

**Keywords:** Rotary kiln, the wall of rotary kiln, temperature fluctuations.

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông Vận tải

\*Email: ndkhoat\_ktn@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 06/9/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/10/2022

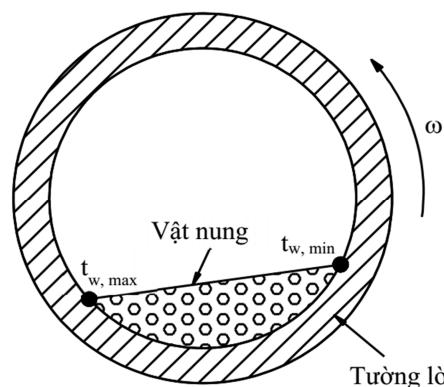
Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2022

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lò quay xi măng là một ống thép hình trụ có xây gạch chịu lửa và cách nhiệt ở bên trong, quay quanh trục với tốc độ từ 1 đến 3 vòng/phút, được đặt nghiêng so với mặt phẳng nằm ngang khoảng 3 đến 5 độ; kích thước lò rất lớn: chiều dài từ 30 đến 238m, đường kính bên trong lò từ 2 đến 8m [5]. Chuyển động quay của lò, dù với tốc độ chậm nhưng cũng tạo ra tính đặc thù về truyền nhiệt của tường lò so với các lò công nghiệp đứng yên. Tính đặc thù này thể hiện ở quá trình truyền nhiệt bên trong giữa tường với khí và vật nung; quá trình truyền nhiệt bên ngoài giữa tường với môi trường không khí xung quanh.

Đối với quá trình truyền nhiệt bên trong, do chuyển động quay của lò, nhiệt độ bề mặt bên trong tường không ổn định mà thay đổi một cách tuần hoàn theo từng vòng quay: khi tiếp xúc với dòng khí, nhiệt độ bề mặt tăng dần theo thời gian, đạt đến giá trị cực đại, sau đó giảm dần khi tiếp xúc với vật nung cho đến khi đạt giá trị ban đầu trước

khi bắt đầu một chu kỳ mới. Ở quá trình truyền nhiệt bên ngoài, vì lò quay có kích thước hình học rất lớn nên chúng thường đặt ở ngoài trời, do đó tốc độ, hướng gió và độ bám bụi vỏ lò thay đổi liên tục làm cường độ trao đổi nhiệt đối lưu và bức xạ giữa vỏ lò và môi trường không khí xung quanh cũng thay đổi theo. Ngoài ra, các lò quay thường được đặt nằm nghiêng so với mặt phẳng nằm ngang nên cũng ảnh hưởng đến cường độ trao đổi nhiệt đối lưu. Các quá trình truyền nhiệt giữa tường với môi trường xung quanh quyết định tổn thất nhiệt của lò và qua đó ảnh hưởng tới hiệu suất nhiệt của chúng. Đã có một số công trình tính toán quá trình truyền nhiệt của tường lò quay, có thể tìm thấy các kết quả nghiên cứu này trong [2, 3, 7-10]. Tuy nhiên, việc phải xác định nhiều thông số để tính toán lượng nhiệt trao đổi giữa tường lò với môi trường bên trong và giữa tường lò với môi trường bên ngoài trong các công trình này khiến cho tính toán gặp nhiều khó khăn đặc biệt khi chỉ phải nghiên cứu riêng rẽ vai trò của tường trong quá trình truyền nhiệt. Hơn nữa, khảo sát dao động nhiệt độ của tường không chỉ làm cơ sở cho tính toán tổn thất nhiệt qua tường mà còn là cơ sở để tính toán, lựa chọn vật liệu phù hợp với điều kiện làm việc của các lò quay xi măng. Lý thuyết truyền nhiệt đã khảo sát biến thiên nhiệt độ của vật dày vỏ hạn khi nhiệt độ bề mặt thay đổi một cách tuần hoàn và được trình bày rất kỹ trong [1, 6]. Tuy nhiên, với vật thể có tính đặc thù về truyền nhiệt như tường các lò quay thì có rất ít công trình công bố về vấn đề này. Trong bài báo này, tác giả tiến hành xây dựng mô hình toán học nhằm xác định dao động nhiệt độ tường lò quay xi măng.



Hình 1. Thiết diện ngang lò quay

**2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ**

**2.1. Mô hình toán học xác định dao động nhiệt độ tường lò quay**

**2.1.1. Các giả thiết khi xây dựng mô hình:**

Trên cơ sở phân tích quá trình truyền nhiệt của tường lò quay, tiến hành xây dựng mô hình toán học nhằm xác định dao động nhiệt độ của tường lò. Để xây dựng mô hình tính toán cần có các giả thiết:

- Coi vật liệu làm tường là đồng chất, đẳng hướng
- Các thông số nhiệt vật lý của tường không thay đổi theo nhiệt độ
- Chiều dày tường lò quay bé hơn rất nhiều so với đường kính của nó và gradien nhiệt độ theo phương bán kính lớn hơn nhiều so với hai phương còn lại [5]. Do đó, theo Holman J. P [6] tính toán quá trình truyền nhiệt qua tường có thể xem như là quá trình truyền nhiệt qua tấm phẳng mà không gặp phải sai số lớn.

**2.1.2. Mô hình toán học**

Trên cơ sở các giả thiết được đề cập trong mục 2.1.1. Phương trình vi phân biểu diễn quá trình truyền nhiệt trong tường lò quay như sau:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \tag{1}$$

Trong đó, a là hệ số dẫn nhiệt độ của tường, m<sup>2</sup>/s

Điều kiện biên: Như đã phân tích ở trên, nhiệt độ bề mặt bên trong tường lò biến thiên tuần hoàn theo từng vòng quay. Theo lý thuyết chuỗi, hàm tuần hoàn này thu được từ việc khai triển chuỗi Fourier. Khi đó, phương trình biểu diễn biến thiên nhiệt độ bề mặt bên trong tường lò có dạng:

$$t(0, \tau) = t_w(\tau) = \bar{t}_w + a_1 \cdot \cos(\omega \cdot \tau) + b_1 \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \tag{2}$$

Trong đó:

$\bar{t}_w$  - nhiệt độ trung bình bề mặt bên trong tường lò, °C

$\omega$  - tần số dao động, rad/s

$\tau$  - thời gian chuyển động một vòng quay của lò, s

$a_1, b_1$  là các hệ số được xác định bằng công thức sau:

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T t_w(\tau) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\tau$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T t_w(\tau) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) d\tau$$

Ở đây, T là chu kỳ dao động.

Theo Barr P. V [7], thời gian tường lò tiếp xúc với vật nung bằng một phần tư thời gian lò quay được một vòng. Tức là, khi  $\omega \cdot \tau = 0$  thì:

$$t_w = t_{w,\min} = \bar{t}_w + a_1 \rightarrow a_1 = t_{w,\min} - \bar{t}_w$$

Khi  $\omega \cdot \tau = \frac{3\pi}{2}$  thì:

$$t_w = t_{w,\max} = \bar{t}_w - b_1 \rightarrow b_1 = \bar{t}_w - t_{w,\max}$$

Thay  $a_1, b_1$  vào (2) ta được phương trình biểu diễn biến thiên nhiệt độ bề mặt bên trong tường:

$$t_w(\tau) = \bar{t}_w + (t_{w,\min} - \bar{t}_w) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) + (\bar{t}_w - t_{w,\max}) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \tag{3}$$

Phương trình (1) và (3) chính là mô hình toán học mô tả quá trình dẫn nhiệt trong tường lò quay. Giải phương trình (1) kết hợp với điều kiện biên (3) sẽ xác định được dao động nhiệt độ của tường theo từng vòng quay.

Từ phương trình (1) nhận thấy, tại từng thiết diện ngang của lò, biến thiên nhiệt độ của tường phụ thuộc vào chiều dày và chuyển động quay của lò. Do đó, nghiệm của phương trình (1) có dạng:

$$t(x, \tau) = \bar{t}_w + \Delta t(x, \tau) \tag{4}$$

Sử dụng phương pháp phân ly biến số, đặt:

$$\Delta t(x, \tau) = \psi(x) \cdot \phi(\tau) \tag{5}$$

Phương trình nghiệm (4) trở thành:

$$t(x, \tau) = \bar{t}_w + \psi(x) \cdot \phi(\tau) \tag{6}$$

Để xác định các hàm số của biến độc lập trong phương trình (5) ta đặt:

$$\phi(\tau) = e^{(-i \cdot \omega \cdot \tau)} \tag{7}$$

Khi đó:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \psi(x) \cdot \phi'(\tau) = \psi(x) \cdot (-i \cdot \omega) \cdot e^{(-i \cdot \omega \cdot \tau)} \tag{8}$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \psi''(x) \cdot \phi(\tau) = \psi''(x) \cdot e^{(-i \cdot \omega \cdot \tau)} \tag{9}$$

Thay biểu thức (8) và (9) vào phương trình (1) ta được phương trình vi phân cấp hai tuyến tính thuần nhất:

$$\psi''(x) + \frac{i \cdot \omega}{a} \cdot \psi(x) = 0 \tag{10}$$

Nghiệm của phương trình (10) sẽ có dạng:

$$\psi(x) = \psi_0 \cdot e^{(-i \cdot \delta \cdot x)} \tag{11}$$

Sử dụng nghiệm (11), phương trình (10) chuyển thành:

$$-\delta^2 \cdot \psi_0 \cdot e^{(-i \cdot \delta \cdot x)} = -\frac{i \cdot \omega}{a} \cdot \psi_0 \cdot e^{(-i \cdot \delta \cdot x)} \tag{12}$$

Suy ra:  $\delta^2 = \frac{i \cdot \omega}{a}$  hay  $\delta = \sqrt{i} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{a}}$

Theo công thức Euler, ta có:

$$e^{i \frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + i \cdot \sin \frac{\pi}{2} = i$$

$$\rightarrow \sqrt{i} = \pm e^{i \frac{\pi}{4}} = \pm \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \cdot \sin \frac{\pi}{4} \right) = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} (1 + i)$$

Do đó:  $\delta = \pm (1 + i) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}$  (13)

Thay các biểu thức (7), (11), (13) vào biểu thức (5) ta được:

$$\Delta t(x, \tau) = \psi_0 \cdot \exp \left[ \pm (1 - i) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot x \right] \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot \tau) \tag{14}$$

Từ đây ta rút ra hai nghiệm thực:

$$\Delta t_1(x, \tau) = \psi_{01} \cdot \exp \left( \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot x \right) \cdot \cos \left( \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot x + \omega \cdot \tau \right) \tag{14a}$$

$$\Delta t_2(x, \tau) = \psi_{02} \cdot \exp \left( -\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot x \right) \cdot \cos \left( -\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot x + \omega \cdot \tau \right) \tag{14b}$$

Nhận thấy, nhiệt độ tường lò sẽ giảm dần từ bề mặt bên trong ra bề mặt bên ngoài theo phương chiều dày. Tức là, nếu  $x \rightarrow \infty$  thì  $\Delta t \rightarrow 0$ . Khi đó, nghiệm (14a) không thỏa mãn điều kiện này nên bị loại.

Từ điều kiện biên (3) suy ra:

$$\Delta t_w = (t_{w,\min} - \bar{t}_w) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) + (\bar{t}_w - t_{w,\max}) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) = A \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi) \tag{15}$$

Trong đó:

$$A = \sqrt{(t_{w,\min} - \bar{t}_w)^2 + (\bar{t}_w - t_{w,\max})^2}$$

$$\varphi = \text{arctg} \left( \frac{t_{w,\min} - \bar{t}_w}{\bar{t}_w - t_{w,\max}} \right)$$

Mặt khác, khi  $x = 0$  thì phương trình (14b) trở thành:

$$\Delta t(0, \tau) = \Delta t_w = \psi_{02} \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \tag{16}$$

Cân bằng phương trình (15) và (16) ta được:

$$\psi_{02} = \frac{A \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)}{\cos(\omega \cdot \tau)} \tag{17}$$

Thay (17) vào (14b) nghiệm phương trình (6) trở thành:

$$t(x, \tau) = \bar{t}_w + \frac{A \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{\sqrt{2 \cdot a}} \cdot x\right)} \cdot \cos\left(-\frac{\omega}{\sqrt{2 \cdot a}} \cdot x + \omega \cdot \tau\right) \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)}{\cos(\omega \cdot \tau)} \tag{18}$$

Phương trình (18) biểu diễn dao động nhiệt độ của tường lò quay.

### 2.2. Đối tượng và kết quả tính toán

Đối tượng tính toán được lựa chọn là lò quay xi măng Hoàng Thạch. Các thông số cơ bản của lò quay được nhà máy xi măng Hoàng Thạch cung cấp; nhiệt độ nhỏ nhất, lớn nhất và giá trị nhiệt độ trung bình tại bề mặt bên trong tường lò được tính toán theo [4]. Các thông số cơ bản và thông số tính toán được trình bày trong bảng 1.

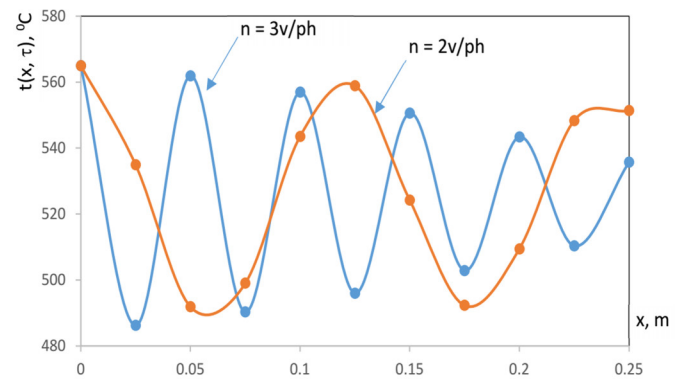
Bảng 1. Các thông số tính toán tường lò quay

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều dày tường	$\delta$	0,25	m
Tốc độ quay	$n$	2÷3	vòng/phút
Nhiệt độ bé nhất tại bề mặt bên trong tường	$t_{w,\min}$	485	$^{\circ}\text{C}$
Nhiệt độ lớn nhất tại bề mặt bên trong tường	$t_{w,\max}$	564	$^{\circ}\text{C}$
Nhiệt độ trung bình tại bề mặt bên trong tường	$\bar{t}_w$	525	$^{\circ}\text{C}$
Hệ số dẫn nhiệt độ của tường	$a$	$1,338 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2/\text{s}$

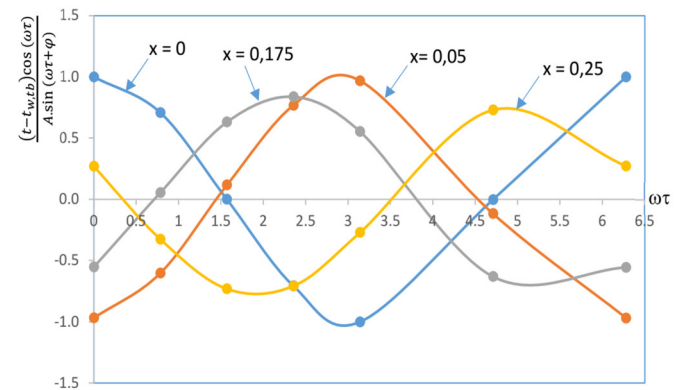
Đọc theo phương bán kính từ bề mặt bên trong ra bên ngoài lò, chia tường thành 10 phần tử, mỗi phần tử có chiều dày 0,025m. Sử dụng phần mềm Microsoft Excel, phương trình (18) được tính cho 10 phần tử này theo thứ tự từ bề mặt bên trong ra bề mặt ngoài cùng của tường với các thông số tính toán cho trong bảng 1 sẽ xác định được quy luật phân bố nhiệt độ của tường lò. Kết quả tính toán được thể hiện trên đồ thị hình 2.

Từ đồ thị hình 2 nhận thấy, dao động nhiệt độ tại các vị trí khác nhau theo phương bán kính có dạng hàm cosin với

biên độ giảm dần từ bề mặt tường lò phía bên trong ra bên ngoài. Kết quả nghiên này phù hợp với quy luật truyền nhiệt nhiệt trong thực tế. Từ đây có thể xác định nhiệt độ tường lò tại các vị trí khác nhau và là cơ sở để tính toán tổn thất nhiệt qua tường. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khi giảm tốc độ quay của lò tức thời gian để tường lò thực hiện một chu kỳ tăng lên thì chiều dài bước sóng nhiệt truyền trong tường tăng lên. Cụ thể, khi tốc độ quay của lò giảm từ 3 vòng/phút xuống 2 vòng/phút thì chiều dài bước sóng nhiệt tăng lên từ 0,025m lên 0,075m. Khảo sát dao động nhiệt độ của vật có nhiệt độ bề mặt biến thiên tuần hoàn như tường các lò quay, bên cạnh quy luật phân bố nhiệt độ đã thu được ở trên thì biên độ và pha dao động là những thông số đặc trưng cần xét đến. Kết quả nghiên cứu thu được cũng cho phép khảo sát phân bố nhiệt độ của tường lò ở các thời điểm khác nhau, được thể hiện trên đồ thị hình 3.



Hình 2. Phân bố nhiệt độ tường lò theo chiều dày



Hình 3. Biến thiên nhiệt độ trong tường lò tại các thời điểm khác nhau

Kết quả nghiên cứu thể hiện trên đồ thị hình 3 cho thấy, biến thiên nhiệt độ tại các vị trí khác nhau của tường lò theo phương bán kính ở các thời điểm khác nhau cũng có dạng hình cosin và có cùng chu kỳ dao động như ở bề mặt nhưng khác nhau ở biên độ và pha. Biên độ dao động nhiệt độ giảm dần từ bên trong ra bên ngoài tường lò. Tại các vị trí khác nhau của tường theo phương bán kính, sự lệch pha trong dao động nhiệt xuất hiện; ở vị trí  $x = 0,05\text{m}$  biến thiên nhiệt độ lệch pha so với biến thiên nhiệt độ tại bề mặt  $x = 0\text{m}$  một nửa chu kỳ. Kết quả nghiên cứu này là cơ sở để tính toán, lựa chọn vật liệu làm tường sao cho phù hợp với điều kiện làm việc trong các lò quay. Kết quả tính toán chỉ

ra trên đồ thị hình 3 cũng cho thấy, biến thiên nhiệt độ tại bề mặt bên trong tường lò  $t(o, \tau)_{\max} - t(o, \tau)_{\min} = 79^{\circ}\text{C}$ , biến thiên nhiệt độ tại bề mặt bên ngoài tường lò  $t(x = 0,25, \tau)_{\max} - t(x = 0,25, \tau)_{\min} = 36,6^{\circ}\text{C}$ . Kết quả này trùng khớp với kết quả nghiên cứu của Gorog J. P [8], theo đó biến thiên nhiệt độ bề mặt tường lò không bao giờ vượt quá  $100^{\circ}\text{C}$ .

Đánh giá độ chính xác của mô hình tính toán là điều rất quan trọng nhưng việc phải đo đạc các thông số trên một lò quay đang hoạt động hoặc xây dựng mô hình thực nghiệm đồ sộ như lò quay xi măng còn gặp rất nhiều khó khăn. Tuy vậy, sự trùng khớp của kết quả tính toán so với các kết quả đã được công bố trước đây có thể khẳng định mô hình tính toán cho độ tin cậy cao, có thể áp dụng để tính toán cho các lò quay xi măng trong thực tế.

### 3. KẾT LUẬN

- Trên cơ sở phân tích quá trình truyền nhiệt của tường lò quay, đã xây dựng và giải thành công mô hình toán học xác định dao động nhiệt độ tường lò quay theo phương bán kính và theo chuyển động quay của lò. Đây là kết quả mới về khoa học, có thể ứng dụng để khảo sát dao động nhiệt độ tường lò cho các lò quay xi măng trong thực tế.

- Kết quả tính toán không những làm cơ sở xác định tổn thất nhiệt qua tường để từ đó nghiên cứu giải pháp nhằm giảm lượng nhiệt tổn thất này mà còn làm cơ sở tính toán, lựa chọn vật liệu làm tường phù hợp với môi trường làm việc khắc nghiệt như các lò quay xi măng.

[7]. Barr P. V., 1986. *Heat Transfer Processes in Rotary Kilns*. PhD. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada

[8]. J. P. Gorog J. P., 1982. *Heat Transfer in Direct - Fired Rotary Kilns*. PhD. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada

[9]. Jenkins B. G., 1976. *Heat Transfer in Rotary Cement Kilns*. University of Surrey

[10]. Sri Silvia Agustini, 2006. *Regeneration action of the wall on the heat transfer for directly and indirectly heated rotary kiln*. Dissertation.

---

#### AUTHOR INFORMATION

**Nguyen Dang Khoat**

University of Transport and Communications

---

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Dang Quoc Phu, Tran The Son, Tran Van Phu, 2004. *Truyen nhiet*. Viet Nam Education Publishing House.

[2]. Dang Quoc Phu, 1992. *Quy luat truyen nhiet trong lo quay va mo hinh toan hoc cua ns*. Doctoral thesis, Hanoi University of Science and Technology.

[3]. Tran Gia My, Nguyen Dang Khoat, 2018. *Mo hinh mo phong qua trinh truyen nhiet trong lo quay xi mang*. Thermal Energy Review, 143, P19 - 22

[4]. Nguyen Dang Khoat, 2020. *Modeling of the temperature fluctuations in the wall of the rotary kiln*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, 56(1), P84 - 86

[5]. Moles F. D., Watson D., Lain P. B., 1973. *The Aerodynamics of the Rotary Cement Kiln*. Journal of the Insitute of Fuel, 6, P353 - 362

[6]. Holman J. P., 2010. *Heat Transfer*. Tenth Edition, McGraw - Hill, New York