

KHẢO SÁT SỰ BIẾN THIÊN ÁP SUẤT BUỒNG THANG THOÁT HIỂM CỦA NHÀ CAO TẦNG KHI XẢY RA CHÁY

SURVEYING THE PRESSURE VARIATION IN EMERGENCY STAIRCASES OF HIGH-RISE BUILDINGS IN THE EVENT OF FIRE

Nguyễn Quang An¹, Nguyễn Chí Tinh²

¹Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy; annqt34@yahoo.com.vn

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất; tinhthd2004@gmail.com

Tóm tắt - Khi xảy ra cháy trong các tòa nhà cao tầng, để ngăn khói và khí độc vào cầu thang thoát hiểm, buồng thang phải được tạo áp suất dư bằng hệ thống điều áp cầu thang. Áp suất dư trong buồng thang phải trong giới hạn cho phép để đảm bảo ngăn được khói, đồng thời không tạo ra lực cản quá lớn khi mở cửa thoát hiểm. Áp suất dư trong buồng thang phụ thuộc vào nhiều yếu tố và biến đổi phức tạp trong quá trình thoát hiểm. Bài báo này trình bày phương pháp mô phỏng sự biến thiên của áp suất dư trong buồng thang với các tình huống khác nhau. Việc mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm FDS, đây là phần mềm chuyên dùng để mô phỏng động lực học của đám cháy. Qua đó đề xuất giải pháp giúp cải thiện tốt hơn hiệu quả hoạt động của hệ thống điều áp cầu thang.

Từ khóa - mô phỏng; khói; cháy; cầu thang; áp suất

Abstract - When fires happen in high-rise buildings, to prevent smoke and toxic gases into the emergency staircase, excess pressure must be created in the staircase by stair pressurization systems. Excess pressure in the staircase must be at permissible limits to stop the smoke, and cannot create a resistance force too big to open the exit door. Excess pressure in the staircase depends on many factors and complex changes in the emergency exit process. This paper presents simulation methods of pressure variation in the staircase in different situations. The simulation is performed using FDS software, a special software to simulate the dynamics of the fire. Thereby the paper proposes measures to improve operational efficiency of the stair pressurization systems.

Key words - simulation; smoke; fire; stair; pressure

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, vấn đề an toàn cho con người khi xảy ra cháy trong các tòa nhà cao tầng là vấn đề rất được quan tâm. Khi xảy ra cháy, khói và khí độc có thể lan nhanh đến các khu vực xung quanh, trong đó có cả cầu thang thoát hiểm. Để ngăn khói vào cầu thang thoát hiểm, trong các tòa nhà cao tầng hiện nay đều có hệ thống điều áp cầu thang để tạo ra áp suất dư trong buồng thang [1], [6]. Việc thiết kế hệ thống điều áp cầu thang có thể dựa theo các tiêu chuẩn khác nhau như BS 5588-part4-1998 của Anh, NFPA-92A-1988 của Mỹ, AS1668-1 của Australia, CP13 của Singapor. Theo tiêu chuẩn TCVN-6160-1996 thì áp suất dư trong buồng thang hoặc phòng đệm không được nhỏ hơn 2 kG/m² (xấp xỉ 20 Pa) [4].

Áp suất dư trong buồng thang phụ thuộc vào nhiều yếu tố và biến đổi trong quá trình hoạt động của hệ thống. Trong quá trình thoát hiểm, các cửa luôn mở ra rồi đóng lại làm cho áp suất dư biến đổi. Do chất khí có tính đàn hồi nên sự biến đổi của áp suất dư rất phức tạp. Việc xác định qui luật biến đổi của áp suất dư không thể thực hiện bằng các phép tính toán thông thường. Các phần mềm mô phỏng sẽ giúp giải quyết bài toán này.

Các tài liệu kỹ thuật hiện nay mới chỉ đề cập đến việc tính toán hệ thống điều áp cầu thang trong chế độ tĩnh mà chưa có đề cập đến chế độ động [1]. Phương pháp mô phỏng dưới đây cho phép khảo sát, đánh giá chế độ động để đưa ra các giải pháp nâng cao chất lượng cho hệ thống điều áp cầu thang. Đây là phương pháp đang được ứng dụng rộng rãi trên thế giới.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

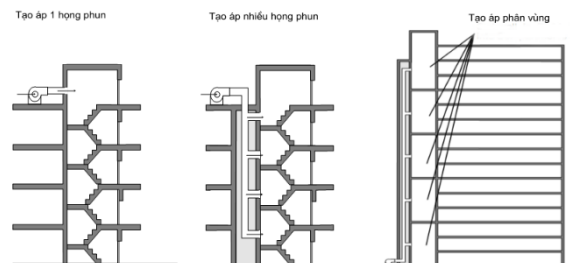
2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Hệ thống điều áp cầu thang

Hệ thống điều áp dùng để tăng áp suất ở những khu vực

cần ngăn chặn khói. Hệ thống điều áp cần tạo ra áp suất dư đủ lớn để ngăn chặn khói vào các khu vực thoát hiểm, nhưng áp suất dư cũng không được quá lớn để đảm bảo cho trẻ em và người già có thể đẩy được cửa thoát hiểm. Hệ thống điều áp cầu thang có thể áp dụng cho cả thang bộ và thang máy. Dưới đây chỉ đề cập đến hệ thống điều áp đối với cầu thang bộ thoát hiểm.

Trong hệ thống điều áp có thể sử dụng một họng phun hoặc nhiều họng phun, với những tòa nhà siêu cao tầng đôi khi phải sử dụng hệ thống điều áp phân vùng để tránh ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói. Trên Hình 1 mô tả các kiểu điều áp khác nhau tùy theo cấu trúc của tòa nhà.



Hình 1. Hệ thống điều áp cầu thang

2.1.2. Áp suất dư trong trong chế độ tĩnh

Khi hệ thống điều áp cầu thang hoạt động ở chế độ tĩnh, do ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói nên áp suất dư trong buồng thang thay đổi theo độ cao.

Sự chênh lệch nhiệt độ giữa bên trong và bên ngoài cầu thang là nguyên nhân gây ra hiệu ứng ống khói. Nhiệt độ trong buồng thang có thể tính theo công thức [7], [8]:

$$T_s = T_o + \eta(T_B - T_o) \quad (1)$$

Trong đó: T_s : Nhiệt độ trong buồng thang (K);

T_o : Nhiệt độ bên ngoài nhà (K);

T_B : Nhiệt độ trong tòa nhà (K);

η : hệ số truyền nhiệt.

Áp suất dư tại độ cao y [7], [8]:

$$\Delta p_{SB_y} = \Delta p_{SBb} + \frac{yF_T}{F_R} \quad (2)$$

Trong đó: Δp_{SB_y} : áp suất dư tại độ cao y (Pa);

Δp_{SBb} : áp suất dư tại tầng dưới cùng (Pa);

y : độ cao (m);

F_T : hệ số nhiệt độ (Pa/m);

F_R : hệ số dòng chảy.

Áp suất dư ở tầng trên cùng [7], [8]:

$$\Delta p_{SBt} = \Delta p_{SBb} + \frac{HF_T}{F_R} \quad (3)$$

Trong đó: H là chiều cao của tòa nhà (cầu thang)

Hệ số nhiệt độ [7], [8]:

$$F_T = \frac{gP_{atm}}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (4)$$

Trong đó:

g : gia tốc trọng trường, thường lấy $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;

P_{atm} : áp suất khí quyển (Pa);

R : hằng số khí, thường lấy $R = 287 \text{ J/kg.K}$.

Tại mức nước biển, biểu thức trên trở thành:

$$F_T = 3200 \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (5)$$

Hệ số dòng chảy [7], [8]:

$$F_R = 1 + \frac{A_{SB}^2 T_B}{A_{BO}^2 T_S} \quad (6)$$

Trong đó:

A_{SB} : diện tích thoát khí giữa cầu thang với tòa nhà (m^2);

A_{BO} : diện tích thoát khí giữa tòa nhà với bên ngoài (m^2);

T_B : nhiệt độ trong tòa nhà (K);

T_S : nhiệt độ trong cầu thang (K).

Trong trường hợp A_{SB} nhỏ hơn nhiều so với A_{BO} thì có thể lấy $F_R \approx 1$.

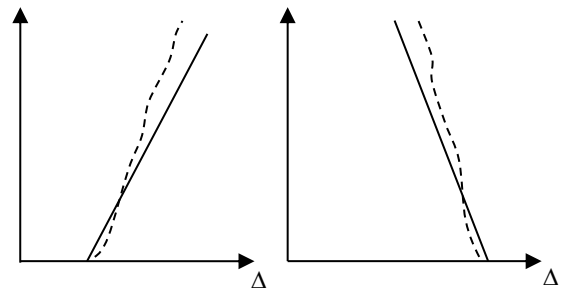
Trên Hình 2 là đồ thị minh họa sự thay đổi của áp suất dư theo chiều cao tòa nhà trong các điều kiện khí hậu khác nhau.

Áp suất dư trung bình [7], [8]:

$$\Delta p_{SBav} = \frac{4}{9} \left(\frac{\Delta p_{SBt}^{3/2} - \Delta p_{SBb}^{3/2}}{\Delta p_{SBt} - \Delta p_{SBb}} \right)^2 \quad (7)$$

Trường hợp áp suất dư ít thay đổi có thể tính gần đúng theo công thức:

$$\Delta p_{SBav} = \frac{\Delta p_{SBt} - \Delta p_{SBb}}{2} \quad (8)$$



a, Khí hậu mùa đông

b, Khí hậu mùa hè

———— Cầu thang không có khe hở

----- Cầu thang có khe hở

Hình 2. Sự thay đổi của áp suất dư theo độ cao

Theo công thức (3) thì chiều cao tòa nhà càng lớn thì độ chênh lệch áp suất giữa tầng trên cùng và dưới cùng càng nhiều, khi đó áp suất dư trong buồng thang có thể nằm ngoài giới hạn cho phép. Chiều cao giới hạn của tòa nhà để áp suất dư nằm trong giới hạn cho phép [7], [8]:

$$H_m = 2,89 \cdot 10^{-4} \frac{F_R (\Delta p_{max} - \Delta p_{min})}{\left| \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right|} \quad (9)$$

Trường hợp chiều cao tòa nhà vượt quá chiều cao giới hạn thì cần phải có giải pháp để khắc phục sự chênh lệch áp suất, chẳng hạn như giải pháp điều áp phân vùng.

Ví dụ:

Cho biết $T_o = 295 \text{ K}$ (22°C), $T_s = 300 \text{ K}$ (27°C)

Theo QCVN 06:2010 [5]:

$\Delta p_{max} = 50 \text{ Pa}$, $\Delta p_{min} = 20 \text{ Pa}$

$F_R = 1$ ($A_{SB} < A_{BO}$)

Áp dụng công thức trên ta tính được $H_m = 153,5 \text{ m}$

Nếu nhiệt độ bên trong và bên ngoài tòa nhà càng chênh lệch thì ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói càng mạnh, khi đó chiều cao giới hạn sẽ càng giảm.

2.1.3. Áp suất dư trong chế độ động

Chế độ động có thể xuất hiện khi quạt gió thay đổi tốc độ, các van gió đóng hoặc mở, cửa thoát hiểm đóng hoặc mở, môi trường biến đổi... Các tác động đó làm cho áp suất dư biến đổi theo thời gian. Việc khảo sát sự biến đổi của áp suất dư có thể dựa vào phương trình miêu tả dòng chảy của chất lưu, đó là phương trình Navier-Stokes.

Phương trình Navier-Stokes được xây dựng từ các định luật bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng, được viết cho một thể tích bất kỳ [2], [9]. Dạng tổng quát của phương trình:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f \quad (10)$$

Trong đó: $\nabla p = \overline{\text{grad}} p$ là Gradient áp suất;

T là Tensor ứng suất;

$\nabla \cdot T = \text{div} T$ là các lực biến dạng trong chất lưu, thông thường do hiệu ứng của tính nhớt;

f là các lực khác (chẳng hạn như trọng lực).

Áp dụng với chất khí ta có phương trình viết dưới dạng tensor [9]:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} \quad (11)$$

Trong đó: p là áp suất ;

τ là tensor ứng suất ;

ρ là khối lượng riêng ;

$f_{d,i}$ đặc trưng cho lực cản chưa xác định ;

u là vận tốc có 3 thành phần $u_1 = u_x$; $u_2 = u_y$; $u_3 = u_z$.

Đây là phương trình vi phân riêng phi tuyến nhiều ẩn số. Cho đến nay chưa có lời giải hoàn chỉnh cho phương trình này. Phương pháp phổ biến hiện nay để giải bài toán này là sử dụng phương pháp sai phân gần đúng với sự trợ giúp của máy tính.

Phương pháp mô phỏng số trực tiếp (DNS) thực hiện bằng cách chuyển trực tiếp phương trình Navier-Stokes sang phương trình sai phân. Tuy nhiên theo phương pháp đó thì khối lượng tính toán sẽ rất lớn và sẽ mất rất nhiều thời gian để giải một bài toán.

Phương pháp phổ biến hiện nay để giải bài toán này là sử dụng phương pháp LES (Viết tắt của *Large Eddy Simulation*), phương pháp này xuất phát từ việc lọc thông thấp trong một khoảng cách Δ để loại bỏ bớt những thành phần biến thiên nhỏ, nhờ đó mà giảm được khối lượng tính toán. Đây là phương pháp được sử dụng trong phần mềm FDS.

2.2. Mô phỏng sự biến thiên của áp suất dư trong buồng thang thoát hiểm bằng phần mềm FDS

2.2.1. Sử dụng phần mềm FDS để mô phỏng sự biến thiên của các thông số

FDS (viết tắt của *Fire Dynamics Simulator*) là một phần mềm mô phỏng động lực học chất lưu của dòng khí và lửa chuyển động. Phần mềm này giải quyết các bài toán mô phỏng LES trên cơ sở các phương trình Navier-Stokes [2], [3], [9], [10].

Kết quả mô phỏng thường được hiển thị dưới dạng hình ảnh 3D nhờ phần mềm Smokeview đi kèm với FDS. Ngoài ra các dữ liệu mô phỏng còn được lưu trong file có phần mở rộng là csv. Có thể hiển thị kết quả dưới dạng đồ thị bằng cách mở file với Excel, sau đó tạo đồ thị với công cụ Chart [3].

Bài toán mô phỏng được đặt ra với 2 trường hợp:

- Trường hợp 1: Tòa nhà 20 tầng. Quạt tăng áp có $Q_{\max} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{\max} = 500 \text{ Pa}$;
- Trường hợp 2: Tòa nhà 40 tầng. Quạt tăng áp có $Q_{\max} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{\max} = 500 \text{ Pa}$.

Các thông số còn lại trong 2 trường hợp giống nhau:

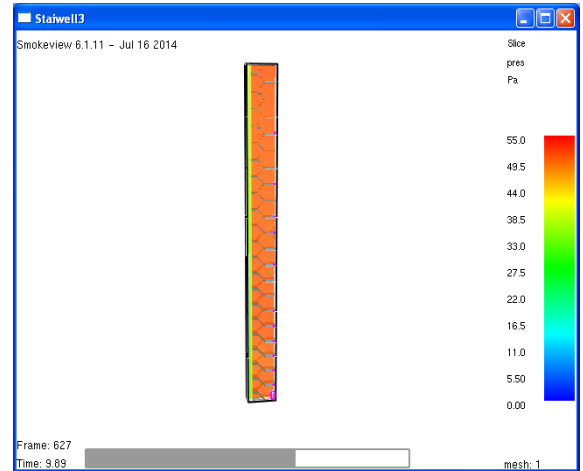
- Diện tích buồng thang: $(5 \times 3) \text{ m}$;
- Chiều cao mỗi tầng: 3 m;
- Nhiệt độ trong buồng thang: 25°C ;
- Nhiệt độ ngoài trời: 22°C ;
- Quạt tăng áp được đặt trên tầng thượng.

Trong thời gian đầu tất cả các cửa thoát hiểm đều đóng, đến thời điểm 10s thì cửa tầng dưới dùng mở ra và đến thời

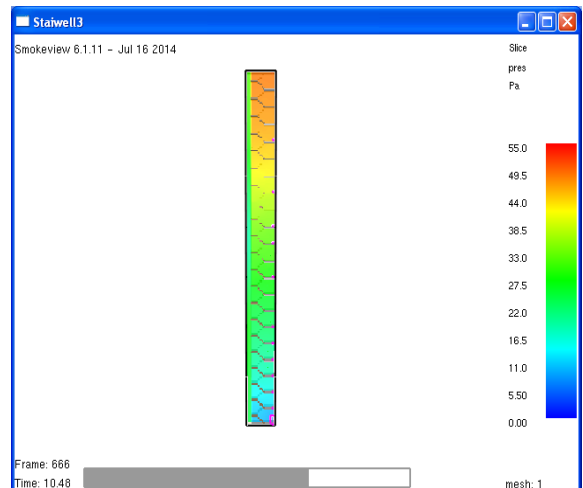
điểm 11s thì đóng lại. Giả thiết bỏ qua quán tính của quạt gió khi khởi động.

2.2.2. Kết quả mô phỏng

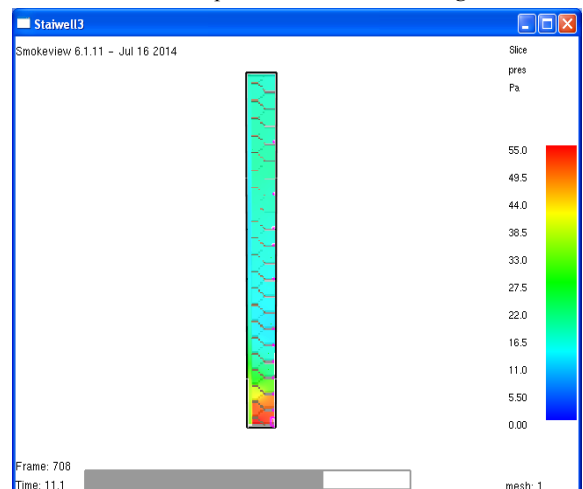
Sau khi thực hiện chương trình mô phỏng cho 2 trường hợp. Kết quả mô phỏng xem bằng Smokeview nhận được như Hình 3 cho tòa nhà 20 tầng (trường hợp 1) và Hình 4 cho tòa nhà 40 tầng (trường hợp 2). Trong đó nhiệt độ tại mỗi vị trí được xác định thông qua thang vạch màu.



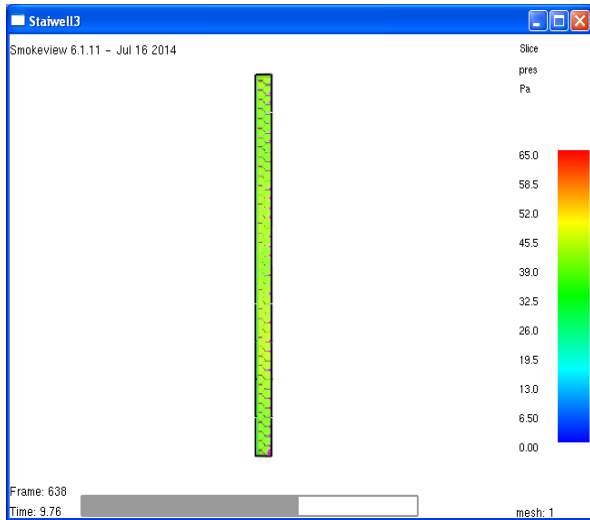
Hình 3a. Áp suất dư trước khi mở cửa tầng 1



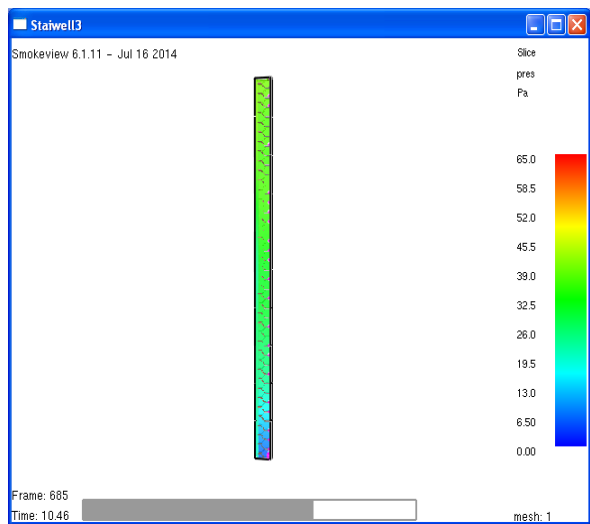
Hình 3b. Áp suất dư khi mở cửa tầng 1



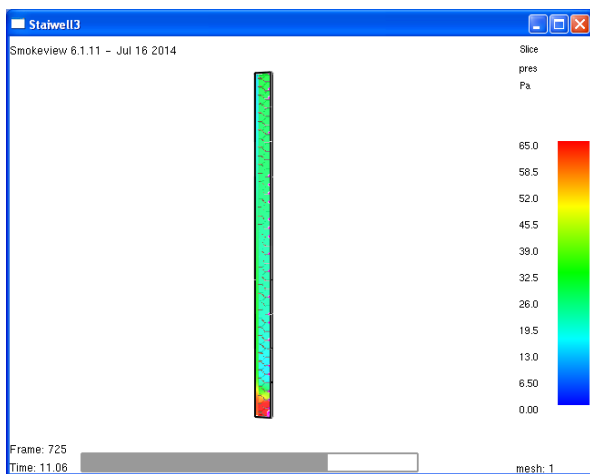
Hình 3c. Áp suất dư sau khi đóng cửa tầng 1



Hình 4a. Áp suất dư trước khi mở cửa tầng 1

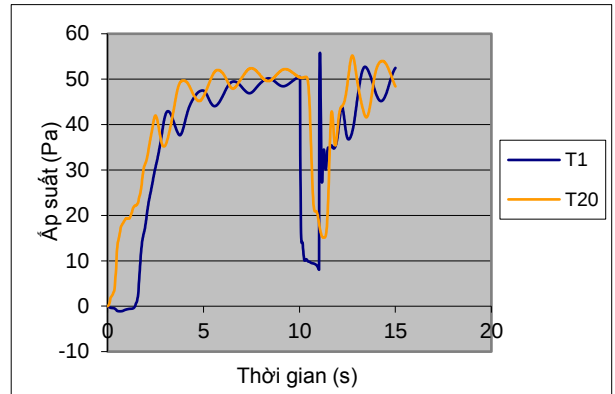


Hình 4b. Áp suất dư khi mở cửa tầng 1

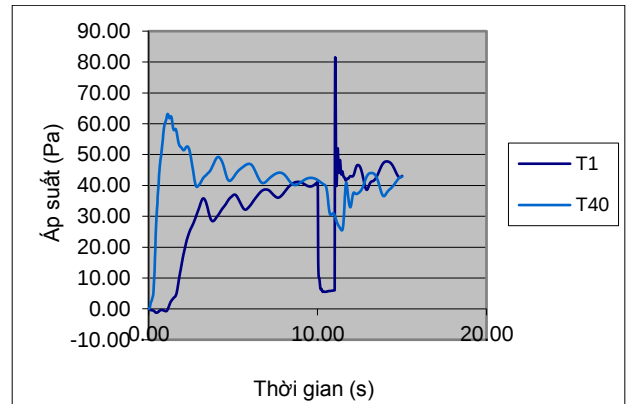


Hình 4c. Áp suất dư sau khi đóng cửa tầng 1

Kết quả mô phỏng có thể theo dõi sự biến thiên áp suất dư ở từng tầng của tòa nhà. Trên đồ thị (Hình 5) hiển thị sự biến thiên của áp suất dư ở tầng trên cùng và tầng dưới cùng trong 2 trường hợp.



Hình 5a. Sự thay đổi của áp suất dư (TH 1)

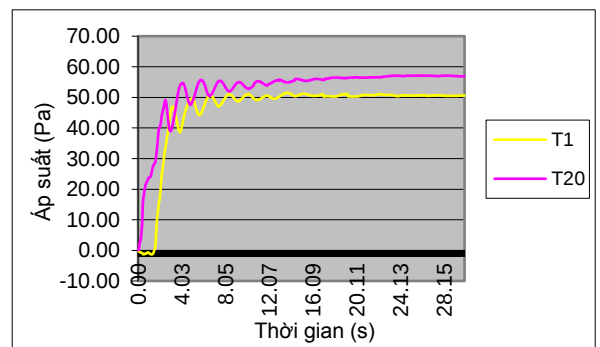


Hình 5b. Sự thay đổi của áp suất dư (TH 2)

Nếu không có tác động nhiễu do mở và đóng cửa thì sau một khoảng thời gian, áp suất dư trong buồng thang sẽ ổn định và hệ thống trở về chế độ tĩnh. Với tòa nhà 20 tầng như trong trường hợp 1, nếu không có tác động nhiễu thì đồ thị biến thiên áp suất như trên Hình 6. Độ chênh áp giữa tầng trên cùng và dưới cùng sau khi ổn định đạt giá trị khoảng 7 Pa. Nếu tính theo công thức (3) của chế độ tĩnh thì độ chênh áp là:

$$\Delta p_{SBt} - \Delta p_{SBb} = \frac{HF_T}{F_R}$$

$$= 3200.67,2 \left(\frac{1}{295} - \frac{1}{298} \right) = 7,3 \text{ Pa}$$



Hình 6. Sự thay đổi của áp suất dư khi không có nhiễu

3. Bàn luận

Kết quả mô phỏng cho thấy, khi hệ thống điều áp cầu

thang hoạt động thì áp suất dư trong buồng thang biến thiên phức tạp. Trong quá trình biến đổi của áp suất dư luôn kèm theo sự dao động. Nguyên nhân của sự dao động chính do tính đàn hồi của chất khí mà được thể hiện thông qua phương trình Navier – Stokes.

Khi một cửa thoát hiểm mở ra rồi đóng lại, áp suất dư tại khu vực đó có sự biến đổi đột ngột. Theo đồ thị biến thiên của áp suất dư ta thấy:

- Trong khoảng thời gian đầu, khi áp suất buồng thang chưa kịp tăng thì áp suất dư ở tầng 1 có lúc có giá trị âm do ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói.

- Trước khi mở cửa thoát hiểm thì áp suất dư trong buồng thang tương đối ổn định.

- Khi mở cửa thoát hiểm tầng 1 tại thời điểm 10s thì áp suất dư tại đó giảm xuống dưới 10 Pa (trong cả 2 trường hợp).

- Khi cửa thoát hiểm tầng 1 được đóng trở lại ở thời điểm 11s thì áp suất dư tại đó tăng vọt lên rồi mới giảm xuống giá trị bình thường. Trong trường hợp 2 thì hiện tượng tăng vọt áp suất diễn ra mạnh hơn so với trường hợp 1. Áp suất dư trong trường hợp 2 vượt quá 80 Pa rồi giảm xuống. Hiện tượng tăng vọt áp suất dư có thể tạo ra các xung lực không mong muốn và thậm chí có thể tạo ra các tình huống nguy hiểm.

- Áp suất dư ở tầng 1 biến thiên nhiều hơn so với các tầng trên do tính đàn hồi của cột không khí. Chiều cao cột không khí càng lớn thì tính đàn hồi càng mạnh làm cho áp suất dư biến thiên càng nhiều. Ở đây chiều cao cột không khí được tính từ vị trí đặt quạt (tầng thượng) đến vị trí cần khảo sát. Ở trường hợp 2, do chiều cao của cột không khí gấp đôi so với trường hợp 1 nên áp suất dư trong buồng thang biến thiên nhiều hơn.

- Nếu không có tác động nhiễu do mở và đóng cửa thì khi hệ thống ổn định, độ chênh áp giữa tầng trên cùng và dưới cùng qua mô phỏng phù hợp với kết quả tính theo công thức trong chế độ tĩnh.

4. Kết luận

Việc nghiên cứu chế độ động của hệ thống điều áp cầu thang vốn là bài toán rất phức tạp. Hiện nay ở trong nước chưa có công trình khoa học nào nghiên cứu về vấn đề này, trong khi các nhà cao tầng ở Việt Nam không áp dụng giải pháp

phân vùng để điều áp như các nước phát triển. Phương pháp mô phỏng bằng phần mềm FDS cho phép khảo sát và đánh giá sự biến thiên của các thông số, qua đó đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng cho hệ thống điều áp cầu thang.

Qua so sánh kết quả nghiên cứu trên đây cho thấy khi hệ thống điều áp cầu thang hoạt động thì áp suất dư trong buồng thang biến thiên phức tạp và chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố. Trong đó một yếu tố quan trọng là chiều cao của tòa nhà. Chiều cao của tòa nhà càng lớn thì ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói càng lớn, dẫn đến sự chênh lệch áp suất dư giữa tầng trên và tầng dưới càng nhiều. Mặt khác khi chiều cao tòa nhà càng lớn thì sự biến thiên của áp suất dư càng phức tạp và khó kiểm soát.

Vì vậy đối với những tòa nhà siêu cao tầng, khi thiết kế hệ thống điều áp cầu thang cần nghiên cứu áp dụng giải pháp điều áp phân vùng. Bằng cách đó vừa giảm được ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói, vừa giảm được sự biến động của áp suất dư.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ngô Văn Xiêm, Trịnh Thế Dũng. *Giáo trình phòng cháy trong xây dựng*. NXB KHKH 2002.
- [2] Nguyễn Quang An. *Ứng dụng phương pháp LES để mô phỏng cho đám cháy*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng. Số 9(94). 2015. Tr 74 – 77.
- [3] Nguyễn Quang An, Nguyễn Chí Tinh. *Đánh giá hệ thống hút khói hành lang bằng phần mềm FDS*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng. Số 3(100). 2016. Tr 5 – 8.
- [4] TCVN 6160-1996. *Phòng cháy chữa cháy nhà cao tầng, yêu cầu thiết kế*.
- [5] QCVN 06:2010. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về an toàn cháy cho nhà và công trình*.
- [6] ASHRAE Handbook- 2007-HVAC Applications (SI).
- [7] John H. Klotz, James A. Milke, Paul G. Turnbull, Ahmed Kashef, Michael J. Ferreira. *Handbook of Smoke Control Engineering*. Ashrae 2012.
- [8] John H. Klotz, James A. Milke. *Principle of Smoke Management*. Ashrae 2002.
- [9] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. National Institute of Standards and Technology. US July 2014.
- [10] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. National Institute of Standards and Technology. US July 2014.

(BBT nhận bài: 06/06/2016, hoàn tất thủ tục phản biện: 24/07/2017)