

ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG ỐNG KHÓI ĐẾN TÍNH TOÁN HỆ THỐNG TĂNG ÁP BUỒNG THANG CHO CÁC TÒA NHÀ CAO TẦNG

Thiếu tá, ThS HOÀNG ĐỨC HẠNH

Khoa Tự động và Phương tiện kỹ thuật phòng cháy chữa cháy và cứu nạn, cứu hộ, Trường Đại học PCCC

*Tác giả liên hệ: Hoàng Đức Hạnh (Email: hoangduchanh@daihocpccc.edu.vn)

Tóm tắt: Hệ thống tăng áp buồng thang đóng vai trò quan trọng trong việc thoát nạn cho con người tại các tòa nhà cao tầng khi xảy ra cháy. Tuy nhiên, sự biến thiên áp suất do hiệu ứng ống khói thường gây ra những sai lệch nghiêm trọng so với tính toán thiết kế hệ thống tăng áp. Bài báo này phân tích cơ chế tác động của hiệu ứng ống khói đến sự phân bố áp suất trong buồng thang bộ, chỉ ra các rủi ro về mất áp suất tầng thấp và quá áp tầng cao. Kết quả phân tích cho thấy việc áp dụng các giải pháp điều khiển tự động như biến tần và thiết kế đa điểm là rất cần thiết để đảm bảo cho hệ thống làm việc ổn định, an toàn.

Từ khóa: tăng áp buồng thang, hiệu ứng ống khói, an toàn cháy nhà cao tầng, kiểm soát khói.

Abstract: Stairwell pressurization systems play a pivotal role in ensuring life safety within high-rise buildings during fires. However, pressure variations caused by the stack effect often lead to significant deviations from the design calculations of pressurization systems. This paper analyzes the underlying mechanism of the stack effect on pressure distribution within the stairwell, highlighting the technical risks of under-pressurization at lower levels and over-pressurization at higher levels. The results demonstrate that implementing dynamic control solutions, such as variable frequency drives and multi-point injection designs, is imperative to guarantee the stable and safe operation of the system.

Keywords: stairwell pressurization, stack effect, high-rise building fire safety, smoke control.

1. Đặt vấn đề

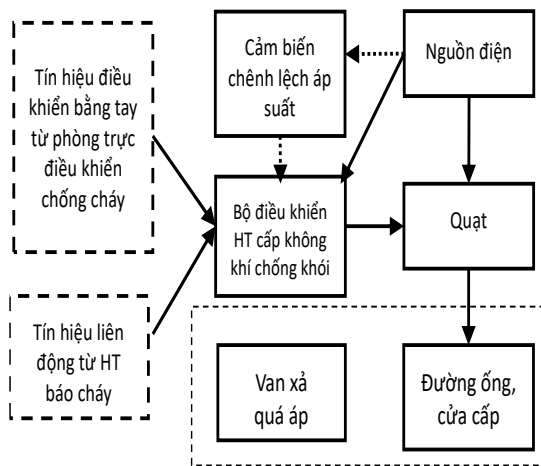
Dưới tác động của quá trình đô thị hóa và phát triển hạ tầng hiện đại, các công trình cao tầng, siêu cao tầng tại Việt Nam không chỉ gia tăng nhanh chóng về số lượng mà còn sở hữu cấu trúc không gian ngày càng phức tạp. Khi xảy ra sự cố cháy, cầu thang bộ là con đường thoát nạn chủ đạo theo chiều dọc và cũng là tuyến đường tiếp cận của lực lượng chữa cháy và cứu nạn cứu hộ. Để ngăn chặn khói xâm nhập, hệ thống tăng áp buồng thang phải duy trì một "hàng rào áp suất" dương ổn định. Tuy nhiên, thực tế thường cho thấy sự không ổn định của áp suất theo chiều cao tòa nhà. Nguyên nhân chính được xác định là do hiệu

ứng ống khói – một hiện tượng vật lý tự nhiên thường ít được đề cập đến trong các bước tính toán thiết kế tĩnh truyền thống. Tại Việt Nam, công tác thiết kế hệ thống cấp không khí chống khói hiện tuân thủ theo các quy định của QCVN 06:2022/BXD (Sửa đổi 1:2023) Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về An toàn cháy cho nhà và công trình và TCVN 5687:2024 Thông gió và điều hòa không khí – Yêu cầu thiết kế. Tuy nhiên, cả hai văn bản này hiện mới chỉ dừng lại ở việc đưa ra các tiêu chí định mức tĩnh dựa trên mô hình khí quyển đồng nhất. Việc hoàn toàn bỏ ngỏ các chỉ dẫn kỹ thuật và công thức tính toán cho hiệu ứng ống khói ở các công trình cao tầng đang tạo ra một khoảng

trống lớn giữa tiêu chuẩn pháp lý và an toàn vận hành thực tế.

2. Tổng quan về hệ thống tăng áp buồng thang và hiệu ứng ống khói

Hệ thống cấp không khí chống khói là hệ thống được điều khiển tự động, có tác dụng ngăn chặn nhiễm khói khi có cháy đối với các gian phòng thuộc vùng an toàn, các buồng thang bộ, các giếng thang máy, các khoang đệm ngăn cháy bằng cách cấp không khí từ ngoài vào và tạo ra áp suất dư trong các khu vực trên, cũng như có tác dụng ngăn chặn việc lan truyền các sản phẩm cháy và cấp không khí, bù lại thể tích sản phẩm cháy đã bị đẩy ra ngoài. Sơ đồ khối hệ thống cấp không khí chống khói như (hình 1).



Hình 1: Sơ đồ khối hệ thống cấp không khí chống khói.

Bình thường, hệ thống làm việc ở chế độ thường trực, quạt cấp không khí chống khói không hoạt động hoặc hoạt động với chế độ công suất thấp nhằm duy trì sự trao đổi không khí tự nhiên cho công trình và tiết kiệm năng lượng.

Khi xảy ra cháy, hệ thống báo cháy tự động chuyển sang chế độ báo cháy, truyền tín hiệu điều khiển ngoại vi đến bộ điều khiển cấp không khí chống khói. Hệ thống này làm việc, kích hoạt cơ cấu điều khiển quạt hoạt động, hút không khí sạch từ môi trường đẩy qua hệ thống đường ống ống dẫn và cửa cấp, từ đó cung cấp không khí vào các khu vực bảo vệ. Khi đó, áp suất không khí bên trong các khu vực bảo vệ sẽ lớn hơn áp suất không khí bên ngoài kết cấu bao che từ đó ngăn chặn không cho khói xâm nhập từ ngoài vào. Khi người dân, mở các cửa thoát nạn, hệ thống cấp không khí chống khói phải đảm bảo vận tốc

gió qua cửa theo yêu cầu để chống lại sự lan truyền của khói từ tầng xảy ra cháy. Khi giá trị áp suất vượt quá giá trị cho phép, van xả quá áp sẽ tự động mở để cân bằng lại áp suất trong khu vực bảo vệ.

Hệ thống tăng áp buồng thang bộ không chỉ đơn thuần là việc cấp không khí vào không gian kín, mà là một quá trình kiểm soát động nhằm thiết lập điều kiện ngăn chặn khói. Hệ thống làm việc dựa trên ba cơ chế sau:

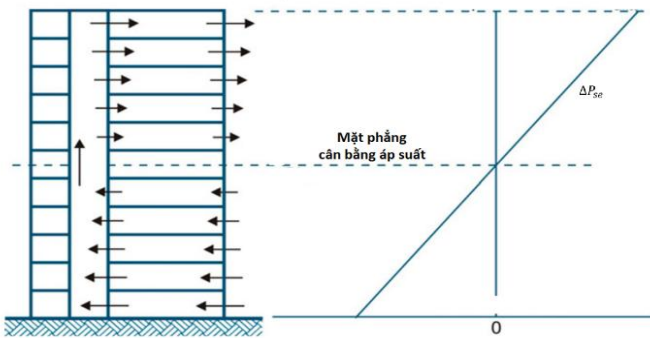
- *Cơ chế chênh lệch áp suất*, đây là nguyên lý cơ bản nhất khi tất cả các cửa buồng thang đều đóng. Hệ thống sử dụng quạt tăng áp cơ khí để đưa không khí sạch vào bên trong, duy trì mức áp suất tĩnh cao hơn áp suất tại các hành lang hoặc khu vực xảy ra cháy. Khi buồng thang duy trì áp suất dương, khói ở vùng có áp suất thấp hơn sẽ bị đẩy ra ngoài và không thể xâm nhập vào bên trong buồng thang.

- *Cơ chế vận tốc dòng khí*, trong tình huống thoát nạn, khi một hoặc nhiều cửa buồng thang bị mở ra, áp suất tĩnh sẽ sụt giảm đột ngột. Lúc này, hệ thống chuyển sang bảo vệ bằng vận tốc dòng khí. Quạt tăng áp phải cung cấp lưu lượng khí đủ lớn để tạo ra vận tốc gió đi ra qua cửa đang mở (thường từ 0.75 m/s đến 1.0 m/s). Vận tốc này hoạt động như một "bức tường khí" đẩy các hạt khói và khí độc ra xa lối thoát nạn, giữ cho môi trường bên trong buồng thang luôn an toàn cho việc di tản.

- *Cơ chế bù đắp rò rỉ và kiểm soát lực mở cửa*, hệ thống phải làm việc dựa trên sự cân bằng giữa việc ngăn khói và đảm bảo khả năng mở cửa cho người thoát nạn. Do không có buồng thang nào kín tuyệt đối, nên khi thiết kế, hệ thống phải tính toán bù lượng khí thất thoát qua các khe hở cửa, vết nứt cấu trúc, giếng thang máy. Nếu áp suất quá cao đặc biệt khi có tác động của hiệu ứng ống khói vào mùa đông, lực cần thiết để mở cửa có thể vượt quá giới hạn an toàn 133N.

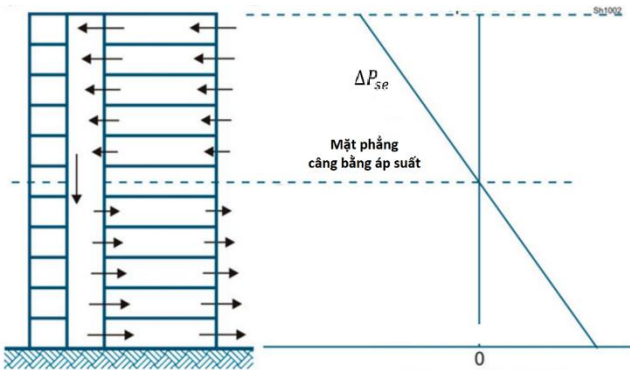
Theo tiêu chuẩn NFPA 92 và IBC, hệ thống kiểm soát khói phải đạt được hai ngưỡng giới hạn: áp suất tối thiểu 12,5 Pa để đảm bảo khói không tràn vào cầu thang, áp suất tối đa để không gây ra lực mở cửa vượt quá 133N, nhằm đảm bảo khả năng thoát nạn cho mọi đối tượng.

Hiệu ứng ống khói là hiện tượng di chuyển của dòng khí đi vào và ra khỏi các tòa nhà thông qua các trục đứng (buồng thang bộ, giếng thang máy, trục kỹ thuật). Hiện tượng này xảy ra do sự chênh lệch mật độ không khí giữa bên trong và bên ngoài tòa nhà, được gây ra bởi sự khác biệt về nhiệt độ. Vào mùa đông, hiệu ứng ống khói thuận xảy ra khi không khí ấm bên trong tòa nhà nhẹ hơn sẽ bay lên cao, tạo ra một vùng áp suất dương ở các tầng trên và áp suất âm ở các tầng dưới (Hình 2).



Hình 2: Chiều chuyển động của không khí trong hiệu ứng ống khói thuận.

Ngược lại, vào mùa hè, hiệu ứng ống khói ngược xảy ra khi không khí trong nhà mát hơn bên ngoài, dẫn đến dòng khí đi xuống (Hình 3).



Hình 3: Chiều chuyển động của không khí trong hiệu ứng ống khói nghịch.

Tại một vị trí nhất định theo chiều cao tòa nhà, tồn tại tập hợp các điểm gọi là mặt phẳng cân bằng áp suất, nơi áp suất bên trong bằng áp suất bên ngoài. Càng xa mặt phẳng này về phía trên hoặc dưới tòa nhà, độ chênh lệch áp suất càng lớn, tạo ra những nhiễu động trực tiếp lên hệ thống tăng áp. Chênh lệch áp suất do hiệu ứng ống khói được tính toán theo công thức [1]:

$$\Delta P_{se} = 3460 \cdot \left(\frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T_1 + 273} \right) \cdot h \quad [1]$$

Trong đó:

ΔP_{se} : Chênh lệch áp suất do hiệu ứng ống khói (Pa)

T_0, T_1 : Nhiệt độ bên ngoài và bên trong nhà ($^{\circ}\text{C}$)

h : Khoảng cách từ mặt phẳng trung hòa (m)

Khi nghiên cứu về ảnh hưởng của hiệu ứng ống khói tác động tới sự hoạt động của hệ thống tăng áp buồng thang trong các tòa nhà cao tầng có 3 trường hợp xảy ra.

- Trường hợp 1: điều kiện nhiệt độ bên trong và bên ngoài nhà cân bằng. Đây là điều kiện lý tưởng, thường được sử dụng trong các tính toán thiết kế tĩnh truyền thống. Không có sự chênh lệch mật độ không khí giữa bên trong và bên ngoài tòa nhà, do đó không phát sinh áp suất từ hiệu ứng ống khói. Áp suất trong buồng thang hoàn toàn do quạt tăng áp quyết định. Biểu đồ áp suất phân bố tương đối đồng đều nếu là cấp khí đa điểm hoặc giảm nhẹ dần theo chiều cao do tổn thất ma sát. Việc duy trì ngưỡng 22,5Pa - 50Pa diễn ra thuận lợi, lực mở cửa nằm trong giới hạn an toàn 133N. Trường hợp này hiếm khi tồn tại trong thực tế nhưng là mốc tham chiếu để so sánh các sai lệch.

- Trường hợp 2: vào mùa Đông, (hiệu ứng ống khói thuận) nhiệt độ bên trong nhà lớn hơn nhiệt độ bên ngoài ($T_{in} > T_{out}$). Đây là trường hợp nguy hiểm nhất đối với các tòa nhà cao tầng tại khu vực có khí hậu lạnh. Không khí ấm trong buồng thang bay lên tạo áp suất dương lớn ở đỉnh và áp suất âm ở đáy tòa nhà. Áp suất này có thể lên tới 4 Pascal cho mỗi tầng. Tại các tầng thấp dưới mặt phẳng cân bằng áp suất, lực hút từ hiệu ứng ống khói triệt tiêu áp suất dương của quạt. Nếu quạt thiết kế 50Pa nhưng hiệu ứng ống khói hút ngược 40Pa, áp suất thực tế chỉ còn 10Pa dưới ngưỡng an toàn 12.5Pa (theo NFPA 92). Khói tràn vào buồng thang ở các tầng dưới. Tại các tầng cao trên mặt phẳng cân bằng áp suất, áp suất dương của hiệu ứng ống khói cộng hưởng với áp suất quạt. Tổng áp suất có thể tăng lên trên 80 - 100Pa dẫn đến nguy cơ lực mở cửa vượt quá 133N, khiến con người đặc biệt là người già và trẻ em không thể mở cửa để vào buồng thang thoát nạn. Hệ thống không đạt được đồng thời ở cả hai mục tiêu: ngăn khói ở tầng thấp và khả năng thoát nạn ở tầng cao.

- Trường hợp 3: tác động khi có rò rỉ khí và mở cửa thoát nạn. Trường hợp này phản ánh thực tế khi

cháy xảy ra và quá trình sơ tán bắt đầu. Sự kết hợp giữa hiệu ứng ống khói và việc mở cửa thoát hiểm tạo ra sự sụt giảm áp suất động không thể dự báo trước bằng các công thức tĩnh. Khi cửa ở các tầng thấp bị mở, hiệu ứng ống khói thuận mùa đông sẽ hút không khí tươi ra ngoài nhanh hơn, làm mất áp suất toàn trực nhanh chóng. Sự rò rỉ qua giếng thang máy thường có khe hở lớn hơn buồng thang bộ sẽ làm dịch chuyển mặt phẳng cân bằng áp suất. Nếu mặt phẳng cân bằng áp suất bị đẩy lên cao, vùng chịu áp suất âm có nguy cơ nhiễm khói sẽ mở rộng lên các tầng giữa của tòa nhà. Quạt tăng áp tốc độ cố định không thể bù đắp lưu lượng biến thiên này, dẫn đến việc vận tốc gió qua cửa mở không đạt mức tối thiểu 0.75m/s.

Để hệ thống tăng áp thực sự hiệu quả cho nhà cao tầng, khi thiết kế phải lấy trường hợp 2 làm căn cứ tính toán công suất tối đa và trường hợp 3 để thiết lập hệ thống điều khiển thông minh. Việc bỏ qua tác động của hiệu ứng ống khói sẽ khiến hệ thống không thể hoạt động theo yêu cầu thiết kế khi xảy ra cháy.

3. Các sai lệch khi tính toán hệ thống tăng áp do tác động của hiệu ứng ống khói

Trong thiết kế truyền thống, thường tính toán dựa trên trạng thái tĩnh tức là nhiệt độ bên trong và bên ngoài nhà bằng nhau. Tuy nhiên, thực tế hiệu ứng ống khói biến áp suất thành một hàm số động, dẫn đến các sai lệch sau:

- Sai lệch về phân bố áp suất thực tế, Trong tính toán hệ thống tăng áp, áp suất thực tế tại một tầng (ΔP_{total}) không chỉ là áp suất do quạt cung cấp (ΔP_{fan}) mà còn bị cộng hoặc trừ bởi chênh áp do hiệu ứng ống khói gây ra (ΔP_{se}). Mùa đông ($T_{in} > T_{out}$), ΔP_{se} có giá trị dương ở tầng cao và âm ở tầng thấp.

Tầng thấp: $\Delta P_{total} = \Delta P_{fan} - |\Delta P_{se}|$. Nếu không tính toán bù, ΔP_{total} có thể rơi xuống dưới 12,5Pa, làm khói tràn vào.

Tầng cao: $\Delta P_{total} = \Delta P_{fan} + |\Delta P_{se}|$ Áp suất có thể vượt ngưỡng 50-60 Pa, làm lực mở cửa vượt quá 133N gây khó khăn cho việc mở cửa

- Sai lệch trong tính toán lưu lượng rò rỉ (Q), Lưu lượng gió cần thiết mà hệ thống quạt phải cung cấp để duy trì áp suất dương trong buồng thang được tính theo công thức [2].

$$Q = 0,827.A_e.(\Delta P)^{1/2} \quad [2]$$

Trong đó:

Q: Lưu lượng rò rỉ (m^3/s)

A_e : Diện tích rò rỉ tương đương (m^2)

ΔP : Chênh lệch áp suất (Pa).

Người ta thường dùng một giá trị ΔP cho các tầng. Nhưng thực tế, ΔP tại mỗi tầng là khác nhau (do hiệu ứng ống khói), ΔP này chính là ΔP_{total} , giá trị đã chịu tác động của hiệu ứng ống khói $\Delta P_{total} = \Delta P_{fan} \pm \Delta P_{se}$ nên lưu lượng rò rỉ qua các khe cửa ở tầng cao có áp suất lớn sẽ cao hơn rất nhiều so với tầng thấp. Nếu không tính đến sự biến thiên này, tổng lưu lượng quạt chọn theo lý thuyết thường bị thiếu hụt từ 15% - 30% so với nhu cầu thực tế để duy trì áp suất ở các tầng dưới.

- Sai lệch về vị trí mặt phẳng cân bằng áp suất. Trong mô hình lý thuyết, mặt phẳng cân bằng áp suất thường được giả định ở khoảng giữa chiều cao tòa nhà nhưng thực tế mặt phẳng cân bằng áp suất bị dịch chuyển bởi các lỗ mở không kiểm soát do không khí bị rò rỉ qua giếng thang máy, trục kỹ thuật, cửa sổ hở. Nếu mặt phẳng cân bằng áp suất bị đẩy lên cao, vùng chịu áp suất âm có nguy cơ nhiễm khói sẽ mở rộng. Các phép tính không dự báo được sự dịch chuyển này sẽ làm hệ thống mất khả năng bảo vệ ở các tầng trung.

- Sai lệch trong tính toán lực mở cửa F theo công thức [3], lực mở cửa phụ thuộc trực tiếp vào chênh lệch áp suất thực tế tại cánh cửa đó:

$$F = F_{dc} + \frac{W.A.\Delta P_{total}}{2.(W-d)} \quad [3]$$

Trong đó

F: Tổng lực cần thiết để mở cửa (N).

F_{dc} : Lực đóng cửa cơ học (N).

W: Chiều rộng của cánh cửa (m).

A : Diện tích cánh cửa (m^2).

ΔP_{total} : Chênh lệch áp suất thực tế giữa buồng thang và hành lang (Pa).

d: khoảng cách từ tay nắm cửa đến mép tự do của cửa (m).

Khi tính toán lực mở cửa, nếu chỉ sử dụng ΔP_{fan} bằng 50 Pa mà bỏ qua ΔP_{se} cực đại vào mùa Đông có thể thêm 20 - 30 Pa, lực mở cửa thực tế sẽ vượt quá giới hạn 133N. Hệ thống đạt vào mùa hè nhưng sẽ gây

kẹt cửa thoát nạn vào mùa Đông, đe dọa trực tiếp đến tính mạng người thoát nạn.

- Sai lệch do bỏ qua sự tương tác giữa các trục đứng, Hệ thống tăng áp cầu thang không hoạt động độc lập. Nó tương tác với giếng thang máy – nơi có hiệu ứng ống khói mạnh nhất. Tính toán thường chỉ tập trung vào buồng thang bộ. Nếu giếng thang máy không được tăng áp, khói sẽ bị hiệu ứng ống khói kéo lên theo giếng thang và rò rỉ ngược vào hành lang các tầng trên, tạo ra áp lực khói lớn hơn nhiều so với tính toán ban đầu mà hệ thống tăng áp của buồng thang phải xử lý.

Các sai lệch này giải thích tại sao nhiều hệ thống tăng áp dù tính toán đúng theo tiêu chuẩn nhưng khi nghiệm thu thực tế hoặc khi vận hành vào mùa đông lại không đạt yêu cầu. Để khắc phục điều này, cần áp dụng các giải pháp điều khiển động và cấp khí đa điểm để bù đắp các sai lệch theo thời gian thực.

4. Các giải pháp kỹ thuật kiểm soát và giảm thiểu tác động của hiệu ứng ống khói đối với hệ thống tăng áp buồng thang

Việc đối phó với hiệu ứng ống khói đòi hỏi sự chuyển dịch từ các thiết kế tĩnh sang các giải pháp động và linh hoạt.

- Hệ thống điều khiển biến tần. Đây là giải pháp hiện đại và hiệu quả nhất để đối phó với tính chất thay đổi theo thời gian của hiệu ứng ống khói. Thay vì quạt chạy ở một tốc độ cố định, hệ thống sử dụng các cảm biến chênh áp đặt tại nhiều cao trình, thường là tầng thấp, tầng giữa và tầng cao. Khi cảm biến phát hiện áp suất ở tầng cao bị đẩy lên quá mức do cộng hưởng với hiệu ứng ống khói mùa đông, bộ điều khiển sẽ giảm tốc độ quạt để hạ áp suất xuống, đảm bảo lực mở cửa không vượt quá 133N. Ngược lại, nếu tầng thấp bị mất áp, quạt sẽ tăng tốc để bù lại.

- Thiết kế cấp khí đa điểm. Các hệ thống cũ thường chỉ cấp khí tại một điểm duy nhất thường là đỉnh hoặc đáy. Điều này khiến áp suất không thể phân bố đều khi có hiệu ứng ống khói. Giải pháp: Sử dụng một ống dẫn khí chạy dọc buồng thang và cấp khí vào buồng thang ở nhiều vị trí ví dụ: cách mỗi 3 - 5 tầng một điểm cấp sẽ giúp hệ thống duy trì biểu đồ áp suất đồng nhất hơn dọc theo chiều cao tòa nhà, giảm thiểu

tình trạng quá áp ở một đầu và thiếu áp ở đầu kia của buồng thang.

- Phân đoạn buồng thang. Đối với các tòa nhà siêu cao tầng (>150m), chiều cao cột khí liên tục là nguyên nhân chính khiến hiệu ứng ống khói trở nên cực đoan. Chia buồng thang bộ thành các đoạn độc lập theo chiều đứng ví dụ đoạn 1 từ tầng 1 - 20, đoạn 2 từ tầng 21 - 40 bằng các cửa ngăn cháy và hệ thống quạt riêng biệt cho từng đoạn. Việc ngắt quãng chiều cao h trong công thức tính ΔP_{se} sẽ làm giảm trực tiếp cường độ của hiệu ứng ống khói tại mỗi đoạn xuống mức có thể kiểm soát được bằng thiết bị thông thường.

- Sử dụng van xả áp điều tiết. Đây là một giải pháp cơ khí thụ động nhưng rất tin cậy để chống quá áp. Lắp đặt các van cánh lật tự động tại các vị trí dễ bị quá áp thường là các tầng cao nhất. Khi áp suất vượt quá ngưỡng cài đặt 50 Pa, sức ép không khí sẽ tự động đẩy mở cánh van để xả bớt gió ra ngoài môi trường hoặc vào trục kỹ thuật, giúp hạ áp suất buồng thang tức thì mà không cần chờ tín hiệu điều khiển điện tử.

- Thiết kế sảnh đệm tạo áp. Việc tạo ra một không gian đệm giữa hành lang và buồng thang giúp giảm bớt áp lực lên hệ thống tăng áp buồng thang. Sảnh đệm được tăng áp thường thấp hơn buồng thang một ít. Nó đóng vai trò như một túi khí giảm chấn, ngăn cản hiệu ứng ống khói từ các khu vực khác của tòa nhà như giếng thang máy tác động trực tiếp vào buồng thang bộ. Ngoài ra, nó giúp duy trì áp suất buồng thang ổn định hơn khi có người mở cửa thoát nạn.

- Kiểm soát rò rỉ tại các trục đứng khác. Hiệu ứng ống khói trong buồng thang bộ thường bị khuếch đại bởi sự rò rỉ khí ở các trục đứng lân cận, đặc biệt là giếng thang máy. Tăng cường độ kín khít của cửa tầng thang máy và sử dụng hệ thống tăng áp riêng cho giếng thang máy. Khi áp suất trong giếng thang máy và buồng thang bộ tương đương nhau, sự dịch chuyển mặt phẳng cân bằng áp suất sẽ ít gây ra các đột biến áp suất nguy hiểm.

Đối với một tòa nhà cao tầng hiện đại, không có một giải pháp đơn lẻ nào là đủ. Giải pháp tối ưu nhất là sự kết hợp giữa phân đoạn buồng thang về mặt kiến trúc và điều khiển tốc độ quạt kết hợp cấp khí đa điểm về mặt cơ điện.

5. Kết luận

Hiệu ứng ống khói không chỉ là một hiện tượng vật lý mà là một yếu tố nhiều động nguy hiểm trong kỹ thuật phòng cháy chữa cháy và cứu nạn cứu hộ nhà cao tầng. Việc thiết kế hệ thống tăng áp buồng thang dựa trên các giá trị tính không còn phù hợp với các công trình siêu cao tầng hiện đại. Các kỹ sư và nhà thiết kế cần chú trọng vào các giải pháp điều khiển động và nghiên cứu sự thay đổi áp suất dưới các điều kiện thời tiết khắc nghiệt để đảm bảo hệ thống luôn sẵn sàng bảo vệ con người trong mọi tình huống cháy.■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Đức Ánh, Đặng Như Định, Phạm Văn Thành, Nguyễn Hữu An, Phạm Hồng Hải (2024), *Giáo trình những vấn đề cơ bản về các hệ thống kỹ thuật phòng cháy, chữa cháy và cứu nạn, cứu hộ*, NXb CAND, Hà Nội
2. QCVN 06:2022/BXD (Sửa đổi 1:2023). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về An toàn cháy cho nhà và công trình.
3. TCVN 5687:2024. Thông gió và điều hòa không khí – Yêu cầu thiết kế .
4. NFPA 92: Standard for Smoke Control Systems.
5. A. Bhatia, Stairwell Pressurization Systems, CED Engineering.
6. Klote, J. H., & Milke, J. A., Design of Smoke Management Systems.
7. IBC Section 909, Smoke Control Systems.