

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721:628.89

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357

Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима

Фам Тхи Хонг Тхам^{1,2,3}, Зьонг Де Тай⁴, Алексей Кириллович Соловьев³

¹ Технологический университет Хошимина; г. Хошимин, Вьетнам;

² Вьетнамский национальный университет Хошимина; г. Хошимин, Вьетнам;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

⁴ Университет Тран Дай Нгиа; г. Хошимин, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние атриума на температурную стратификацию при естественной вентиляции внутри помещений учебно-лабораторного корпуса Московского государственного строительного университета (МГСУ) с помощью натуральных экспериментов. Целью исследования является разработка нового метода расчета геометрических параметров атриума здания с учетом комфорта его температурно-воздушного режима с применением решения разработанных базовых уравнений воздушного потока в сочетании с методами математического моделирования. Получена формула для определения расхода воздуха при естественном охлаждении в атриумах, анализа и проектирования системы естественной вентиляции в здании с атриумом с более чем двумя вытяжными отверстиями. На основании полученных результатов сделан вывод об оптимальной площади вытяжных и приточных проемов в здании атриума при различной его высоте. Эти данные могут иметь практическое применение при проектировании зданий с атриумами.

Материалы и методы. Использованы методы полумпирического исследования, методы простой линейной регрессии для установления корреляции между измеряемыми переменными температурой воздуха и высотой здания в атриуме с конкретными условиями, позволяющими определять температуру на любой высоте.

Результаты. Разработана формула расчета площади вытяжных и приточных отверстий в связи с высотой атриума, установлено их влияние на тепловые характеристики конструкций зданий с атриумами.

Выводы. Результаты исследования позволяют быстро и точно определить геометрические параметры для обеспечения снижения температуры воздуха в зданиях с атриумами. Это играет важную роль на начальном этапе проектирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геометрические параметры, температурная стратификация, высота атриума, тепловые характеристики, конструкции атриума, эффект дымовой трубы, тепловой комфорт, естественная вентиляция, эффективность охлаждения, расход воздуха

Благодарности. Авторы выражают благодарность Национальному исследовательскому Московскому государственному строительному университету за оказание поддержки и предоставление необходимых ресурсов и времени для проведения исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тхам Ф.Т.Х., Зьонг Де Тай, Соловьев А.К. Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 349–357. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357

Автор, ответственный за переписку: Фам Тхи Хонг Тхам, ptham@gmail.com.

Method of calculation of geometrical parameters of building atrium structures considering the comfort of temperature and air regime

Pham Thi Hong Tham^{1,2,3}, De Tai Duong⁴, Aleksey K. Solovyev³

¹ Vietnam National University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT); Ho Chi Minh, Vietnam;

² Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM); Ho Chi Minh, Vietnam;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

⁴ Tran Dai Nghia University (TDNU); Ho Chi Minh, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. The influence of atrium on temperature stratification under indoor natural ventilation of the teaching-laboratory building of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) with the help of full-scale experiments is considered.

Based on this, the aim of the research is to develop a new method of calculating the optimal geometric parameters of a building atrium considering the comfort of its temperature-air regime by solving the developed basic airflow equations in combination with mathematical modelling methods. The formula for determining the air flow rate for natural ventilation in atriums, analyzing and designing a natural ventilation system in a building with an atrium with more than two ventilation outlets was derived. Based on the results obtained, a conclusion is made about the optimal area of exhaust and supply openings in an atrium building at different heights. These data may have practical application in the design of buildings with atriums.

Materials and methods. Semi-empirical research methods were used. Simple linear regression methods were carried out to establish a correlation between the measured variables air temperature and building construction height in an atrium with specific conditions to determine the temperature at any height.

Results. The formula for calculating the optimal area of inlet and outlet openings in connection with the atrium height and their influence on the thermal characteristics of the structures of buildings with atriums was developed.

Conclusions. The results of the research make it possible to quickly and accurately determine the geometric parameters to ensure the reduction of air temperature in buildings with atriums. This plays an important role in the initial design phase.

KEYWORDS: geometrical parameters, temperature stratification, atrium height, thermal characteristics, atrium structures, stack effect, thermal comfort, natural ventilation, cooling efficiency, air flow rate

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) for providing support and providing the necessary resources and time to conduct the research.

FOR CITATION: Pham H.T.T., Duong De Tai, Solovyev A.K. Method of calculation of geometrical parameters of building atrium structures considering the comfort of temperature and air regime. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):349-357. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357 (rus.).

Corresponding author: Pham Thi Hong Tham, ptham0825@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство атриумов с каждым годом становится все более популярным. Атриумы являются стандартной особенностью архитектуры торгово-развлекательных центров и коммерческих зданий [1].

Основным преимуществом использования естественной вентиляции служит ее способность снижать энергопотребление и затраты, создавая при этом здоровую и комфортную среду за счет поступления свежего воздуха в здание [2].

На сегодняшний день проведен ряд исследований, посвященных поиску оптимальной геометрии параметров атриума для различных условий [3–5]. Расположение и размер вытяжных отверстий также влияют на распределение температуры в пространстве атриума, что может смягчить эффект тепловой стратификации в жарком климате, тем самым снижая нагрузку на энергопотребление [6, 7]. Данные результаты практически применяются при проектировании естественно вентилируемых атриумов.

Наряду с формой атриума, размерами и расположением вентиляционных отверстий имеет значение высота здания [8–10]. Было выявлено, что с увеличением размера атриума в рассматриваемом многоэтажном жилом здании повышалась и улучшалась производительность и эффективность работы естественной вентиляции. Но, когда размер атриума достигал определенной величины, эффективность работы вентиляции переставала изменяться [11–13]. В помещениях на нижнем уровне вентиляция улучшалась за счет эффекта тяги, в помещениях на более высоких уровнях наблюдалось отсутствие данного эффекта или его слабое влияние [14]. Помимо прочих геометрических параметров атриума, важное значение для обеспечения теплового комфорта имеют форма его крыши и то, насколько она выше кровли здания; наличие или от-

сутствие на ней остекления, а также остекление вертикальных конструкций атриума [15, 16]. Теплопоступления через остекленные стены и крышу могут оказывать существенное влияние на модель распределения воздушных потоков и температурных полей в атриумном пространстве. Солнечная радиация играет основную роль в создании градиента температур в атриумах, главным образом влияя на температуру крыши [17, 18]. Также крыша атриума удерживает нагретый воздух перед тем, как он будет выброшен наружу, что может сказываться негативно на тепловом комфорте не только атриумного пространства, но и прилегающих помещений [19]. Хотя целью многих исследований была попытка разработать единый подход, применимый к любому атриумному зданию, до сих пор недостаточно информации о том, как различные параметры объемно-планировочного и конструктивного решения проектирования атриума влияют на тепловое состояние и параметры микроклимата в конкретных случаях [20].

Следовательно, необходимо проведение всестороннего исследования геометрических параметров зданий с атриумами в различных климатических условиях с целью облегчения поиска приемов применения естественной вентиляции для широкого спектра зданий и повышения их энергоэффективности. Практическое применение результатов целесообразно на начальном этапе проектирования, чтобы помочь архитектору и инженеру (проектировщику) принимать обоснованные проектные решения с оптимальным количеством приточных и вытяжных проемов и их размеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Построение модели расчета тепловых параметров атриумного здания с использованием полумпирического метода

В основе метода лежат следующие предположения:

- при стабильных условиях, учитывая, что воздух в здании несжимаемый из-за его малой скорости, потоки на входе и выходе из здания сохраняются;
- энергия, получаемая от конвективных теплообменников, теплопроводности через стены и излучения от стеклянной крыши здания, сохраняется и стабильна;
- основываясь на результатах эксперимента в работе [21], предполагается, что температура линейно распределяется по высоте. Поступающий воздух рассеивается и заполняет все здание, прежде чем покинуть его. Это означает, что параметры температуры и давления в вертикальном поперечном сечении Oz одинаковы, когда поток воздуха достигает установившегося состояния.

Закон сохранения массового расхода

Рассматривается воздушный поток в контрольном объеме, как показано на рис. 1. По закону сохранения массового расхода имеется уравнение:

$$\rho_o C_{d1} A_1 v_1 - \rho_i C_{d2} A_2 v_2 - \rho_i C_{d3} A_3 v_3 = 0, \quad (1)$$

где ρ — плотность газа, кг/м^3 ; C_d — коэффициент диссипации скорости при прохождении через тонкие стенки; A — площадь открытия, м^2 ; v — скорость воздуха в потоке, м/с ; индексы 1, 2, 3 представляют вход и выходы соответственно; индексы o и i означают параметры воздуха внутри и снаружи здания.

Предполагается, что распределение температурного поля по высоте подчиняется линейному закону. Температура изменяется вверх за счет излучения извне, как показано на рис. 2. Вертикальный

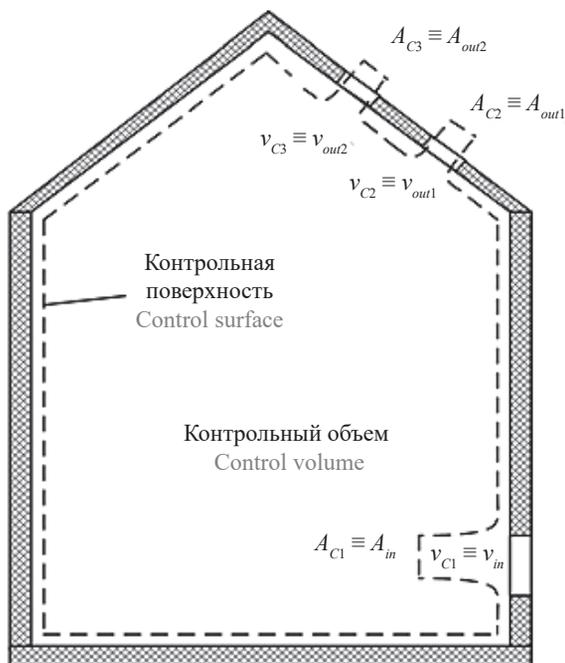


Рис. 1. Контрольный объем и контрольная поверхность
Fig. 1. Control volume and control surface

профиль температуры внутри помещения представлен следующим образом:

$$T_i = T_b + \gamma H_i, \quad (2)$$

где T_i — температура на высоте H_i , $^\circ\text{C}$; T_b — температура пограничного слоя на полу; γ — изменяющийся линейный коэффициент; H_i — высота между двумя вертикальными отверстиями, м.

Высота нижнего отверстия принимается за базовый уровень, а начало координат выбирается в центре входного отверстия. Давление воздуха внутри и снаружи помещения на любой высоте можно записать по выражению:

$$p_i(h) = p_{i0} - \int_0^z \rho_i g dh; \quad (3)$$

$$p_o(h) = p_{o0} - \int_0^z \rho_o g dh.$$

Разность давлений между наружным и внутренним воздухом на любой высоте представлена формулой:

$$\Delta p(h) = -\int_0^z (\rho_o - \rho_i) g dh - (p_{i0} - p_{o0}). \quad (4)$$

Видно, что $\Delta p = p_i - p_o$ — это разница давлений внутри и снаружи здания на любой высоте h . За счет этой разницы создается вентиляция снаружи внутрь, поскольку $\rho_o - \rho_i / \rho_i \approx T_i - T_o / T_o$ и температура изменяется линейно $T(h) = T_b + \gamma h$. Подставляя $T(h)$ в уравнение (4), получаем:

$$\Delta p(h) = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} \int_0^h (T_b - T_o + \gamma h) dh = \quad (5)$$

$$= -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} [(T_b - T_o)h + 0,5 \gamma h^2].$$

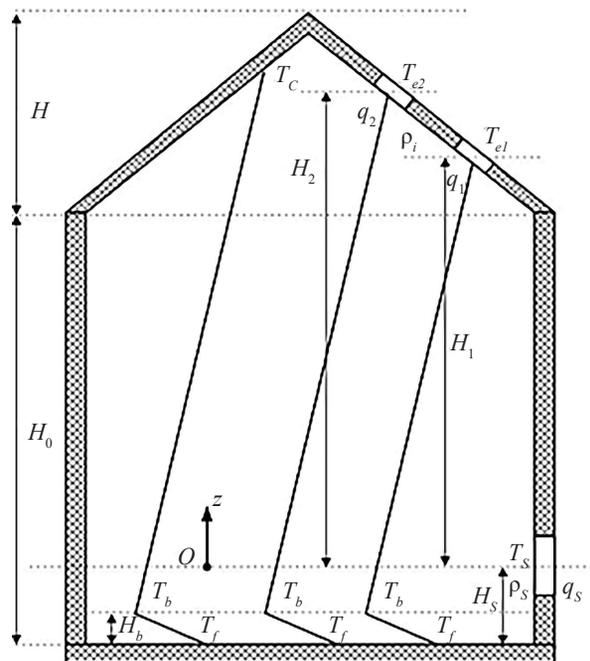


Рис. 2. Изменение температуры пола за счет излучения
Fig. 2. Change in floor temperature due to radiation

Формула (5) представлена разностью давлений на любой высоте снаружи и внутри здания. Из приведенных выше результатов следует, что на входе:

$$h = 0 \rightarrow \Delta p(0) = -\Delta p_0 < 0.$$

Воздух нагнетается в здание благодаря естественной вентиляции.

На высоте отверстия в расстоянии H_1 и H_2 разницы давления равна:

$$\Delta p_1 = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_0} [(T_b - T_0)H_1 + 0,5\gamma H_1^2];$$

$$\Delta p_2 = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_0} [(T_b - T_0)H_2 + 0,5\gamma H_2^2].$$

Применив уравнение Бернулли к потоку воздуха в любом отверстии, получим:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_i + \rho_i \frac{v_i^2}{2} \rightarrow v_i = \\ &= \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_i}} \Rightarrow q = C_d A v = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_i}}. \end{aligned}$$

В итоге расход воздуха на входе и выходе составляет:

$$q = C_{d0} A_0 \Delta p_0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= C_{d1} A_1 \Delta p_1 = \\ &= C_{d1} A_1 \sqrt{\frac{2[\Delta p_0 + \rho g \beta [(T_b - T_0)H_1 + 0,5\gamma H_1^2]]}{\rho}}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_2 &= C_{d2} A_2 \Delta p_2 = \\ &= C_{d2} A_2 \times \\ &\times \sqrt{\frac{2[\Delta p_0 + \rho g \beta [(T_b - T_0)H_2 + 0,5\gamma H_2^2]]}{\rho}}. \quad (8) \end{aligned}$$

Закон сохранения энергии

Сохранение энергии выражает первый закон термодинамики. Для контрольного объема скорость изменения запасенной энергии (кинетической, потенциальной и внутренней) внутри контрольного объема плюс отток запасенной энергии через контрольную поверхность равно скорости обмена теплом и работой (например, чистое поступление тепла и обмен мощностью). Было сделано несколько предположений:

- приточный воздух распределяется по всей площади помещения без потерь;
- температура поверхности потолка равна температуре воздуха у потолка и температуре вытяжного воздуха;
- уравнения излучения линеаризованы из-за умеренной разницы температур.

Система уравнений для сохранения энергии:

$$E = E_1 + E_2, \quad (9)$$

где E — тепловая энергия, полученная от источника тепла в помещении и от солнечного излучения; $E_1 = \rho c_p q_1 (T_{e1} - T_0)$ и $E_2 = \rho c_p q_2 (T_{e2} - T_0)$; T_{e1}, T_{e2} — температура в вытяжном отверстии; ρ — воздух внутри здания (предполагается несжимаемым), плотность воздушного потока; c_p — удельная теплоемкость воздуха; q_1, q_2 — расход воздуха в вытяжном отверстии.

Это уравнение энергии означает, что за счет энергии, которую воздух получает от источника тепла с приходом в здание, температура повышается.

Предположив, что распределение температуры линейно, мы имеем:

$$T_{e1} = T_b + \gamma H_1; T_{e2} = T_b + \gamma H_2. \quad (10)$$

Кроме того, существует также лучистая энергия, поглощаемая полом от крыши, которая передается вниз. Эта энергия выражается следующим уравнением:

$$E_3 = \alpha_f A (T_f - T_b), \quad (11)$$

где α_f — коэффициент конвективной теплоотдачи на полу; A — площадь пола здания; T_f — температура поверхности пола; T_b — температура пограничного слоя.

Энергия E_3 вычисляется следующим способом: энергия излучения от стеклянной крыши передается на пол для его нагрева. Рассмотрим крайне малую площадь dA на стеклянной крыше, которую поглощает стекло, энергия ее излучения составляет:

$$dE_3 = \alpha_r dA (T_c - T_f); \quad (12)$$

$$E_3 = \int_S dE_3 = \frac{2\alpha_r LH}{\sin \alpha} \left[T_b + \gamma H_o + \gamma \frac{H}{3} \right], \quad (13)$$

где α — угол наклона крыши; L — ширина крыши; H — высота крыши.

Кроме того, происходит обмен энергией между воздухом, поступающим в помещение, и полом. Воздух нагревается за счет конвекции у поверхности пола. Обмен энергией описывается уравнением:

$$\rho c_p q (T_b - T_0) = \alpha_f A (T_f - T_b), \quad (14)$$

где $q = q_1 + q_2$ — расход воздуха на входе.

Таким образом, имеем три энергетических уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} E &= \rho c_p q_1 (T_b + \gamma H_1 - T_0) + \\ &+ \rho c_p q_2 (T_b + \gamma H_2 - T_0); \quad (15) \end{aligned}$$

$$\frac{2\alpha_r LH}{\sin \alpha} \left(T_b + \gamma H_o + \gamma \frac{H}{3} \right) = \alpha_f A (T_f - T_b); \quad (16)$$

$$\rho c_p q (T_b - T_0) = \alpha_f A (T_f - T_b). \quad (17)$$

Чтобы определить энергию E , которую получает здание, необходимо знать температуры на выходах T_{e1} , T_{e2} . Это можно сделать путем экспериментов. Из данных параметров можно установить изменяющийся линейный коэффициент температуры γ и T_b следующим образом:

$$\begin{cases} T_{e1} = T_b + \gamma \cdot H_1 \\ T_{e2} = T_b + \gamma \cdot H_2 \end{cases} \Rightarrow \gamma = \\ = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{H_1 - H_2} \Rightarrow T_b = T_{e1} - \gamma \cdot H_1.$$

Подставив результаты в уравнение (15), можно получить общую энергию E , содержащуюся в здании.

Предположим, имеется E , целью является исследование q_1 , q_2 и профиля температуры при изменении геометрических параметров атриума, например площади входа, выходов или высоты открытых вентиляционных отверстий. Для этого решается следующая система двух уравнений итерационным методом с помощью двух уравнений (16) и (17):

$$\begin{cases} f_1(T_b, \gamma) = q_1 - q_2 - q = 0 \\ \Rightarrow f_2(T_b, \gamma) = \rho \cdot c_p \cdot q_1 \cdot (T_b + \gamma \cdot H_1 - T_0) + \\ + \rho \cdot c_p \cdot q_2 \cdot (T_b + \gamma \cdot H_2 - T_0) - E = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Это нелинейное уравнение с двумя переменными T_b и γ . Для нахождения приближенного решения нелинейных уравнений можно использовать метод хорд.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Размер каждого вытяжного отверстия в крыше составляет 1,2 м по ширине, 1,4 м по длине. На крыше есть в общей сложности восемь окон в положении высоты H_1 и восемь окон в положении высоты H_2 , которые полностью открываются. Здание имеет только один входной проем со многими дверями, которые могут изменять площадь приточного проема.

Чтобы определить энергию E , которую получает здание, измеряем температуру на приточных и вытяжных отверстиях для случая, когда открываются пять окон на высоте H_1 и три окна на высоте H_2 : $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество вытяжных отверстий в крыше); $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \times 3 = 5,04 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество вытяжных отверстий в крыше), площадь входа составляет: $A_s = 2,1 \times 0,65 \times 6 = 8,2 \text{ м}^2$ (длина \times ширина \times количество дверей входа). Геометрические параметры измеряемого здания следующие: $H_0 = 19,6 \text{ м}$; $H = 5,0 \text{ м}$; $H_1 = 22,88 \text{ м}$; $H_2 = 20,84 \text{ м}$; $L = 18,54 \text{ м}$.

По прошествии длительного времени тепловые параметры в здании достигают стабильного состояния, измерили температуру на приточных отверсти-

ях $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_1 равна $T_{e1} = 37,8 \text{ }^\circ\text{C}$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_2 составляет $T_{e2} = 36,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Поместив эти параметры в разработанную программу, можно вычислить полученную энергию E от излучения и факторов, которые выделяются в здании, связанных с человеком и оборудованием. Расчет показал, что полученная энергия равна: $E = 118 \text{ кВт}$.

Энергия E будет оставаться постоянной, так как площадь стеклянной крыши для этого здания постоянна и энергия поступает извне. Построение программы для решения уравнений (18), когда E известна, имеет большое значение при проектировании и использовании здания, поскольку имеются возможности ежедневно измерять температуру на крыше и у двери, чтобы знать поток воздуха, температурную стратификацию при изменении площади проема у двери и за порогом. Благодаря программе для вычисления и предложенным формулам архитектор или проектировщик может дать рекомендации по открыванию или закрыванию проемов для достижения желаемой температурной стратификации в здании без необходимости использования измерительного оборудования. Предложенный метод обеспечивает простое решение, помогающее проектировщикам сэкономить время при оценке эффективности вентиляции и выборе оптимального расположения проемов в конструкциях атриумов зданий.

На рис. 3 приведен пример зависимости расхода воздуха от площади приточных отверстий, соответствующий условиям проведения натурного эксперимента и расчетной программы, учитывающей плоскую картину разреза атриума, площадь количества отверстий $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4 \text{ м}^2$; $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 3 = 5,04 \text{ м}^2$. Видно, что, когда вытяжные отверстия полностью закрыты, воздухообмена с внешней средой нет, расход воздуха равен нулю. Когда открываются приточные отверстия, поток воздуха dQ/dA очень быстро увеличивается, но затем градиент потока воздуха dQ/dA уменьшается по мере увеличения площади открывающихся приточных отверстий, а затем насыщается примерно со скоростью $20 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис. 4 представлена зависимость температуры поверхности пола от температуры пограничного слоя. Из-за поглощения тепла от излучения стеклянной крыши температура пограничного слоя воздуха у пола всегда выше температуры поверхности пола. Однако повышение температуры пола и краевого слоя при увеличении площади поверхности пола незначительно. Это можно объяснить тем, что количество излучения от стеклянной крыши постоянно (из-за постоянной площади потолка). И это количество теплового излучения используется для повышения температуры поверхности пола.

На рис. 5 показана температурная стратификация на разных высотах при изменении площади приточных отверстий. Видно, что по мере постепенного

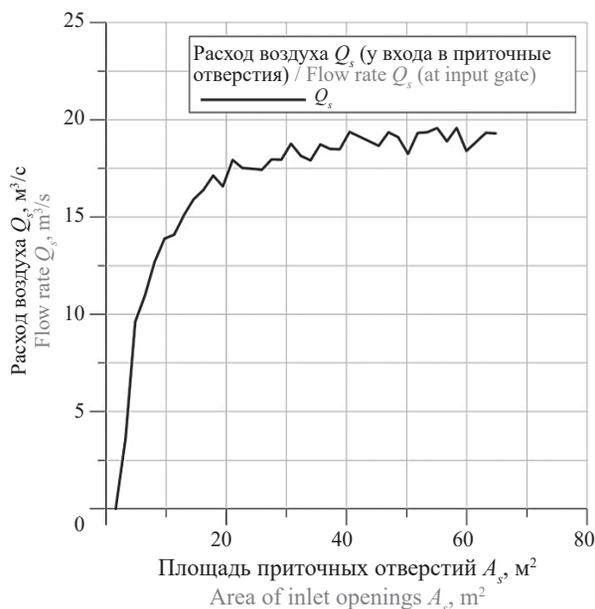


Рис. 3. Зависимость расхода воздуха от площади приточных отверстий при постоянной площади вытяжных отверстий $A_1 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8,4 \text{ м}^2$; $A_2 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 3 = 5,04 \text{ м}^2$

увеличения площади приточных отверстий коэффициент γ постепенно уменьшается и зависит от параметров: H, T, T_s . Она определена по формуле из формулы (2):

$$\gamma = d(T - T_s)/dH, \quad (19)$$

где T — температура воздуха на любой высоте; T_s — температура воздуха у приточных отверстий.

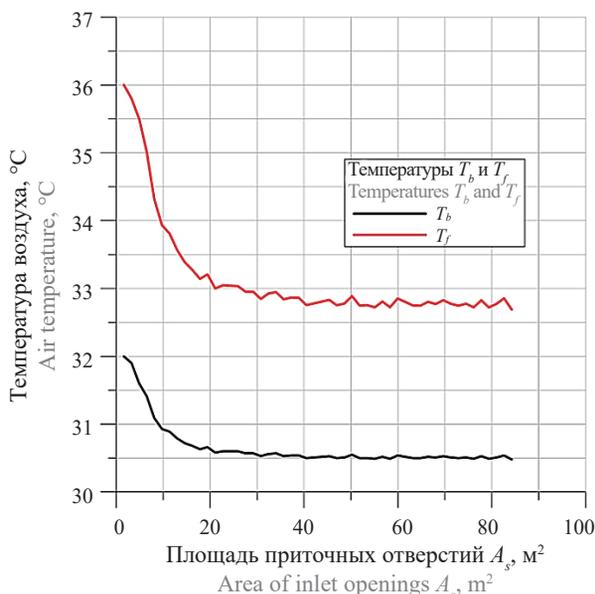


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности пола T_f и температуры пограничного слоя T_b от площади приточных отверстий

Fig. 4. Dependence of the floor surface temperature T_f and boundary layer temperature T_b on the area of inlet openings

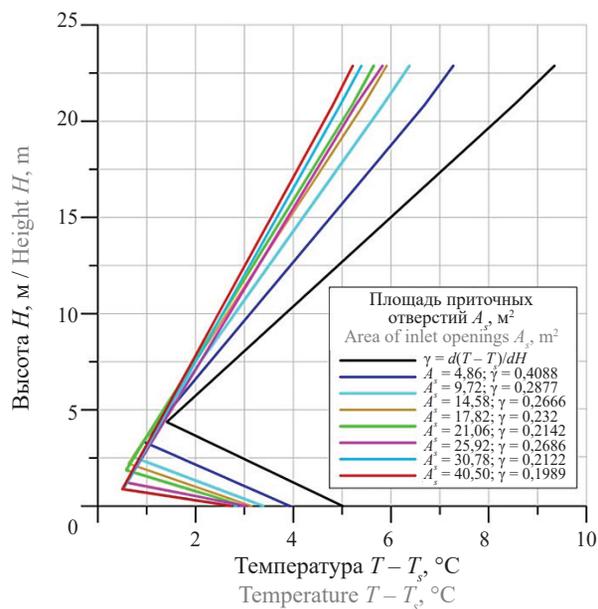


Рис. 5. Зависимость температурной стратификации от высоты над уровнем пола при различных площадях приточных отверстий

Fig. 5. Dependence of temperature stratification on the height above floor level for different areas of inlet openings

Это означает, что разница температур приточных и вытяжных отверстий постепенно уменьшается, что можно объяснить следующим образом: когда приточное отверстие маленькое, объем воздухообмена с внешней средой невелик. На рис. 3 это выражается через небольшой расход при малом открытии приточных отверстий.

Обычно при закрытых дверях здание представляет собой почти закрытую коробку. Тепло, поглощаемое зданием в результате излучения, нагревает воздух в здании, что приводит к повышенному градиенту температур при увеличении приточных отверстий. Маленькая площадь приточных отверстий ведет к более высокой температуре пограничного слоя. По мере постепенного увеличения площади приточных отверстий большее количество воздуха внутри здания обменивается с наружным воздухом, что приводит к разнице температур на разных высотах здания по сравнению с уменьшающейся температурой приточных отверстий, что приводит к уменьшению коэффициента $\gamma = d(T - T_s)/dH$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования получены формулы для определения расхода воздуха в зависимости от высоты, размеров, геометрии и формы атриума, и тепловой стратификации в атриуме здания с естественным охлаждением, влияющие на изменение расхода воздуха, температуры поверхности пола, пограничного слоя и температурной стратификации при изменении площади приточных отверстий с учетом влияния солнечного теплового излучения, пропускаемого стеклянной крышей и поглощаемого внутренними

поверхностями атриума. Рассчитываются следующие два параметра: расход вентиляционного воздуха, график распределения температуры воздуха по высоте помещения. Существуют и другие конструктивные параметры, такие как вентиляционные отверстия, оптимальное соотношение площадей отверстий, высоты здания и т.д. Они могут быть получены из формул, данных для каждой существующей или вновь разработанной модели, по формуле (18).

Таким образом, тепловые характеристики атриума можно улучшить за счет размера и расположения проема при условии, что световой проем в атриуме достаточно велик, а степень открытия приточных отверстий варьируется в зависимости от климатических условий наружного воздуха. Контролируемые площади приточных и вытяжных проемов увеличивают или уменьшают поток воздуха в прилегающих помещениях, определяя оптимальные скорости потока воздуха в этих помещениях. Это влияет на расход электроэнергии на вентиляцию и охлаждение. Исследование в ходе натурного эксперимента эффективных проектных параметров атриумов на их

тепловое состояние поможет проектировщикам и инженерам принять решение о проектировании проемов в естественно вентилируемых зданиях в будущем. Результаты исследования позволят архитекторам и инженерам принимать обоснованное решение о предполагаемых условиях тепловой среды и воздушных потоков. Следовательно, они смогут выбрать оптимальные места расположения проемов, их размеры в зависимости от количества этажей. Кроме того, эти результаты помогут инженерам-проектировщикам сэкономить время на оценку новых проектов, спрогнозировать комфорт в помещениях, оценить эффективность вентиляции, выбрать оптимальную конструкцию открывающихся проемов в кровле зданий и снизить энергопотребление систем механической вентиляции.

В дальнейших исследованиях необходимо изучить влияние размеров, геометрии, формы крыши, материалов покрытия и крепления конструкций кровли атриумов, а также утепленных наружных стен на их эффективность для повышения энергосбережения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Hung W.Y., Chow W.K.* A review on architectural aspects of atrium buildings // *Architectural Science Review*. 2001. Vol. 44. Issue 3. Pp. 285–295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484
2. *Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A.* Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. Pp. 654–670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035
3. *Acred A., Hunt G.R.* Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: A dimensionless design approach // *Building and Environment*. 2014. Vol. 72. Pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007
4. *Wang L., Huang Q., Zhang Q., Xu H., Yuen R.K.K.* Role of atrium geometry in building energy consumption: the case of a fully air-conditioned enclosed atrium in Cold Climates, China // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 151. Pp. 228–241. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.064
5. *Aldawoud A.* The influence of the atrium geometry on the building energy performance // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038
6. *Abdullah A.H., Wang F.* Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification of prediction results // *International Journal of Integrated Engineering*. 2009. Vol. 1. Issue 2. Pp. 79–93.
7. *Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A.* Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. Pp. 654–670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035
8. *Крашенинникова Т.С., Гришкова А.В.* Анализ параметров микроклимата в здании с атриумом в заданных климатических условиях с использованием программы ANSYS FLUENT // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. № 4 (24). С. 46–61. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.04.04.EDNUUZFAB.
9. *Табунициков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В.* Энергоэффективные здания : учебное пособие. М. : АВОК-пресс, 2003. 192 с.
10. *Aldawoud A.* The influence of the atrium geometry on the building energy performance // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038
11. *Holford J.M., Hunt G.R.* Fundamental atrium design for natural ventilation // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. Issue 3. Pp. 409–426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7
12. *Wang X., Huang C., Cao W.* Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 9. Pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002
13. *Holford J.M., Hunt G.R.* Fundamental atrium design for natural ventilation // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. Issue 3. Pp. 409–426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

14. Zhang M., Li N., Zhang E., Hou S., He D., Li J. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: A CFD study // *Proceedings — 6th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, ISHVAC*. 2009. Vol. 2. Pp. 1240–1247.

15. Moosavi L., Mahyuddin N., Ghafar N. Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study // *Building and Environment*. 2015. Vol. 94. Pp. 384–394. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.020

16. Andrew A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: A dimensionless design approach // *Building and Environment*. 2014. Vol. 72. Pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007

17. Li C., Zhang Z., Zhang J., Ji Q. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station // *2011 International Conference on Multimedia Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ICMT.2011.6003151

18. Laouadi A., Atif M.R., Galasiu A. Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. Issue 12. Pp. 1289–1316. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00008-2

19. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 9. Pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

20. Ji Y., Xu M., Zhang T., He Y. Intelligent parametric optimization of building atrium design: a case study for a sustainable and comfortable environment // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 5. P. 4362. DOI: 10.3390/su15054362

21. Фам Тхи Хонг Тхам, Соловьев А.К., Корнеев С.С. А field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 2. С. 149–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48167896> DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158

Поступила в редакцию 19 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 января 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Фам Тхи Хонг Тхам** — преподаватель лаборатории строительной физики; **Технологический университет Хошимина**; Вьетнам, г. Хошимин, район 10, 14-й квартал, ул. Ли Тхьонг Киет, д. 268; **Вьетнамский национальный университет Хошимина**; Вьетнам, г. Хошимин, район 10, 14-й квартал, ул. Ли Тхьонг Киет, д. 268; аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики окружающей среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9515-2143, Scopus: 57222268423, ResearcherID: rid21029, ORCID: 0000-0002-7418-2084; ptham0825@gmail.com;

Зьонг Де Тай — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры базового проектирования; **Университет Гран Дай Нгиа**; Вьетнам, г. Хошимин, район Го Вап, 10-й квартал, ул. Нгуен Оан, д. 189; duongdetai@gmail.com;

Алексей Кириллович Соловьев — доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики окружающей среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3821-9431; kafedraarxitektury@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Hung W.Y., Chow W.K. A review on architectural aspects of atrium buildings. *Architectural Science Review*. 2001; 44(3):285-295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484

2. Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 34:654-670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035

3. Acred A., Hunt G. R Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: a dimensionless design ap-

proach. *Building and Environment*. 2014; 72:44-52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007

4. Wang L., Huang Q., Zhang Q., Xu H., Yuen R.K.K. Role of atrium geometry in building energy consumption: the case of a fully air-conditioned enclosed atrium in Cold Climates, China. *Energy and Buildings*. 2017; 151:228-241. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.064

5. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance. *Energy and Buildings*. 2013; 57:1-5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038

6. Abdullah A.H., Wang F. Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification

of prediction results. *International Journal of Integrated Engineering*. 2009; 1(2):79-93.

7. Moosavi L., Mahyuddin N., Ab Ghafar N., Ismail M.A. Thermal performance of atria: an overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 34:654-670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035

8. Krashennnikova T., Grishkova A. Analysis of thermal environment in the atrium building under given conditions using the ANSYS fluent software. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2016; 4(24):46-61. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.04.04. EDNUUZFAB. (rus.).

9. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy efficient buildings : manual*. Moscow, AVOK-press, 2003; 192. (rus.).

10. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance. *Energy and Buildings*. 2013; 57:1-5. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.038

11. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation. *Building and Environment*. 2003; 38(3):409-426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

12. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building. *Energy and Buildings*. 2009; 41(9):907-914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

13. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation. *Building and Environment*. 2003; 38(3):409-426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

14. Zhang M., Li N., Zhang E., Hou S., He D., Li J. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: A CFD study. *Proceedings — 6th International Symposium*

on Heating, Ventilating and Air Conditioning, ISHVAC. 2009; 2:1240-1247.

15. Moosavi L., Mahyuddin N., Ghafar N. Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study. *Building and Environment*. 2015; 94:384-394. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.020

16. Andrew A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: a dimensionless design approach. *Building and Environment*. 2014; 72:44-52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.007

17. Li C., Zhang Z., Zhang J., Ji Q. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station. *2011 International Conference on Multimedia Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ICMT.2011.6003151

18. Laouadi A., Atif M.R., Galasiu A. Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates. *Building and Environment*. 2002; 37(12):1289-1316. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00008-2

19. Wang X., Huang C., Cao W. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building. *Energy and Buildings*. 2009; 41(9):907-914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

20. Ji Y., Xu M., Zhang T., He Y. Intelligent parametric optimization of building atrium design: a case study for a sustainable and comfortable environment. *Sustainability*. 2023; 15(5):4362. DOI: 10.3390/su15054362

21. Hong-Tham T. Pham, Solovyev A.K., Korneev S.S. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(2):149-158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48167896> DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158 (rus.).

Received December 19, 2023.

Adopted in revised form on January 29, 2024.

Approved for publication on January 31, 2024.

BIONOTES: **Pham Thi Hong Tham** — lecturer at Laboratory of Building Physics, Faculty of Civil Engineering; **Vietnam National University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT)**; 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam; **Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM)**; 268 Ly Thuong Kiet st., District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam; postgraduate student of the Department of Architectural, Structural Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9515-2143, Scopus: 57222268423, ResearcherID: rid21029, ORCID: 0000-0002-7418-2084; ptham0825@gmail.com;

De Tai Duong — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Basic Design; **Tran Dai Nghia University (TDNU)**; 189 Nguyen Oanh st., District Go Vap, Ho Chi Minh City, Vietnam; duongdetai@gmail.com;

Aleksey K. Solovyev — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural, Structural Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3821-9431; kafedraarxitektury@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.