

# РАЗДЕЛ III.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.952.2

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ С ТЕПЛОВЫМ ПОБУЖДЕНИЕМ

**Д.В. Абрамкина**

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия*

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для увеличения эффективности работы систем естественной вентиляции возможно использование теплового побуждения – дополнительного подогрева вытяжного вентиляционного канала, который позволяет увеличить разницу температур между наружным и удаляемым воздухом из помещения, тем самым повышая циркуляционный эффект. Данный метод дает возможность обеспечить стабильный воздухообмен в теплый период года независимо от силы и направления ветра. Однако существующие системы обладают рядом ограничений для применения в многоэтажных жилых зданиях в странах с холодным климатом. Целью исследования является разработка канальной системы вентиляции с тепловым побуждением, подходящей для применения в условиях российского климата для типовых жилых домов.

**Материалы и методы.** Исследование свободной конвекции в условиях внутренней задачи проводилось с помощью решения уравнений Обербека-Буссинеска, а также проведения натурального эксперимента.

**Результаты.** В статье теоретически обоснованы недостатки существующих систем вентиляции с тепловым побуждением. На основе проведенного математического моделирования были выявлены зависимости осевой скорости на входе в систему от расчетной разницы температур при различных способах нагрева вентиляционного канала.

**Выводы.** Полученные результаты иллюстрируют высокую степень влияния месторасположения и величины площади нагрева вентиляционного канала на формирование свободноконвективных течений в нем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тепловое побуждение, естественная вентиляция, воздухообмен, свободная конвекция, конвективные потоки.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- существующие системы вентиляции с тепловым побуждением мало подходят для многоэтажных жилых домов;
- наиболее эффективным и удобным в монтаже методом побуждения является вертикальный нагрев вентиляционного канала совместно с отводом;
- проведенное экспериментальное исследование показывают высокую сходимость численного решения уравнений Обербека-Буссинеска и результатов натуральных измерений.

#### ВВЕДЕНИЕ

Тепловое побуждение является одним из методов интенсификации работы систем естественной вентиляции [1, 2]. Нагрев вентиляционного канала приводит к формированию в нем восходящих конвективных потоков. Движение воздуха в вентиляционном канале возникает за счет наличия неоднородности плотности, вызванной неоднородностью температуры. Модели такого рода исключают наличие внутри канала опускного течения, а также обратной тяги, которые значительно

вливают на эффективность работы системы вентиляции [3].

В системах с радиационным подогревом вентиляционных каналов вытяжной воздуховод представляет собой короб, расположенный снаружи здания, стенки которого изготовлены из лучепрозрачных материалов для обеспечения максимального проникновения прямой и рассеянной солнечной радиации [4].

При попадании солнечных лучей на внутреннюю стенку вытяжного воздуховода, выполненную из материалов с высоким коэффициентом поглощения солнечной радиации, условная температура на ее поверхности увеличивается, вызывая тепловое расширение масс воздуха, находящихся в канале, которое, в свою очередь, приводит к появлению внутренних свободноконвективных течений. Для исключения перегрева помещения в конструкции вентиляционного канала предусматривается теплоизоляционный слой [5]. Он располагается между внутренней стенкой и наружной поверхностью ограждающей конструкции.

Первые исследования крышных систем естественной вентиляции с радиационным по-

догревом вытяжного канала (Рис. 1, а) были проведены Н.К. Бансалом [6,7]. В своей научной работе он представил основную методику расчета расхода воздуха через вентиляционный канал в зависимости от интенсивности солнечной радиации. Кроме того, было выявлено, что расход воздуха на единицу площади поперечного сечения воздуховода уменьшается с увеличением его длины. На основе представленных зависимостей Й. Хирунлабх [8] разработал новую конфигурацию системы с радиационным подогревом, представляющую собой несколько последовательно соединенных каналов, расположенных под разными углами (Рис. 1, б). Позднее, Ш. Лал и др. [9] составили классификацию существующих систем. В периоды года с недостаточным уровнем солнечной радиации возможно применение системы с вертикальным расположением вентиляционного канала [10]. Чаще всего система является реверсивной: если температура наружного воздуха выше, чем температура воздуха в помещении, канал используется для осуществления вытяжки (Рис. 1, в), если ниже – для притока (Рис. 1, г) [11].

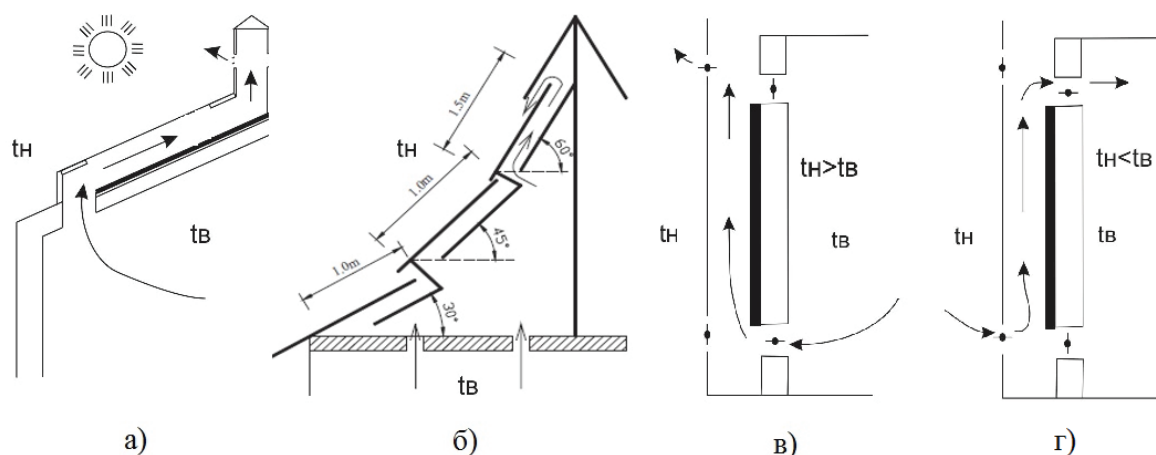


Рисунок 1:  
а) система вентиляции с крышным расположением вытяжного канала;  
б) система вентиляции конструкции Й. Хирунлабха;  
в) принципиальная схема работы вытяжной системы вентиляции с вертикальным расположением вентиляционного канала для удаления воздуха из помещения;  
г) принципиальная схема работы приточной системы с вертикальным расположением вентиляционного канала для подачи воздуха в помещение

Illustration 1:  
a) ventilation system with the roof exhaust duct;  
b) Hiranlabh's ventilation system;  
c) working scheme of the vertical roof exhaust duct;  
d) working scheme of the vertical inlet duct

Однако подобные системы обладают рядом недостатков, которые являются препятствием к их применению в РФ: во внутренней поверхности вентиляционного канала при определенных условиях в холодный период года может образовываться конденсат. Данное явление возникает при попадании влажного и теплого воздуха из помещений в вытяжной канал, при этом условная температура на внутренней поверхности внешней части канала становится ниже температуры точки росы [12]. В нашей стране системы естественной вентиляции применяются в основном в жилых зданиях, наружное размещение прозрачных вентиляционных каналов может значительно испортить внешний облик сооружения, что связано с высоким уровнем загрязненности удаляемого воздуха из помещений кухни. Чистка внутреннего пространства лучепрозрачного вентиляционного канала включает в себя более дорогостоящие операции, чем при использовании традиционных систем [13].

В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что существующие системы вентиляции с тепловым побуждением мало подходят для многоквартирных жилых домов. Однако данный метод интенсификации работы естественной вентиляции имеет свои преимущества: обеспечение стабильного воздухообмена в теплый период года, независимость работы системы от силы и направления ветра, исключение акустического загрязнения от вентиляционного оборудования. Таким образом, целью исследования является разработка канальной системы естественной вентиляции с тепловым побуждением, подходящей для применения в условиях российского климата для типовых жилых домов.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения наиболее эффективного способа подогрева вентиляционного канала, а также выявления зависимости скорости вытяжного воздушного потока от расчетной разницы температур (между внутренним воздухом в помещении и условной температурой на стенке вентиляционного канала) было проведено математическое моделирование свободной конвекции в канальной системе естественной вентиляции последнего этажа жилого здания.

Рассматривается конвективное движение воздуха в канале системы естественной вентиляции, изготовленном из тонколистовой

стали. Движение воздуха происходит в ограниченной незамкнутой области  $\Omega_1$  с условной температурой на подогреваемых стенках  $t_k$  (Рис. 2). Нижняя часть канала является входным сечением  $\Gamma_1$ , через которое внутренний воздух из помещения  $\Omega_2$  с температурой  $t_v$  и давлением  $P_v$  поступает в рассматриваемую область. Верхняя часть канала представляет собой выходное сечение  $\Gamma_2$ , через которое вытяжной воздух с температурой  $t_u$  поступает в атмосферу  $\Omega_3$ .

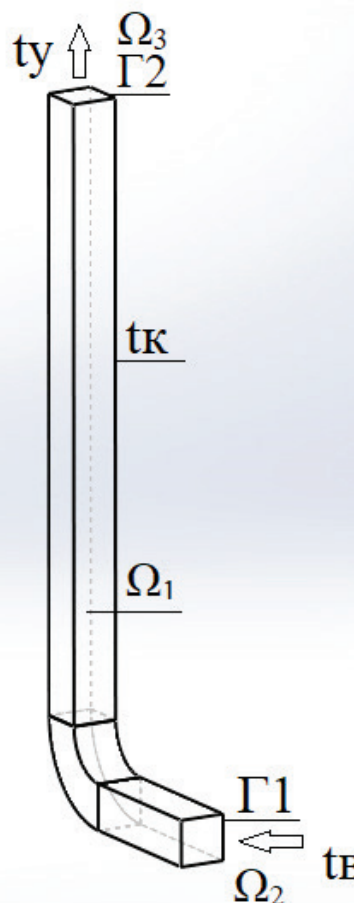


Рисунок 2 – Расчетная схема математической модели  
Illustration 2 – Design diagram of the mathematical model

Месторасположение и величина площади нагрева в значительной степени определяют характер движения воздушных потоков [14]. В связи с тем, что эффективность работы систем естественной вентиляции зависит от равномерности распределения скоростей в канале, предлагается провести сравнительный анализ нескольких способов теплового побуждения: с нижним, горизонтальным, вертикальным и полным подогревом (Рис. 3).

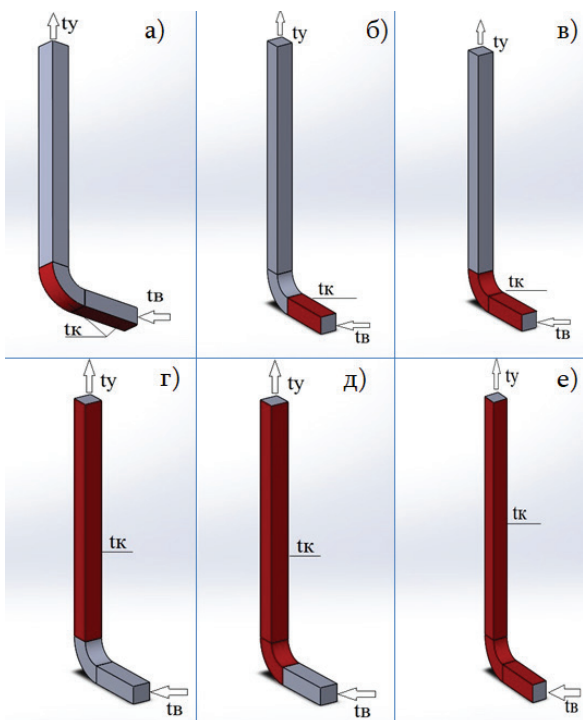


Рисунок 3 – Расчетные схемы нагрева вентиляционного канала:  
а) нижний нагрев (с отводом);  
б) горизонтальный нагрев;  
в) горизонтальный нагрев (с отводом);  
г) вертикальный нагрев;  
д) вертикальный нагрев (с отводом);  
е) нагрев всего канала

Illustration 3 – Design diagrams of the ventilation canal heating:  
a) lower heating (with elbow); b) horizontal heating;  
c) horizontal heating (with elbow);  
d) vertical heating (with elbow); e) whole canal heating

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании проведенных расчетов свободной конвекции в условиях внутренней задачи с помощью решения уравнений Обербека-Буссинеска [15-20] были построены графики зависимости осевой скорости потока на входе в вентиляционный канал от расчетной разницы температур (Рис. 4).

Наиболее эффективным способом побуждения является нагрев всего вентиляционного канала, однако в связи с тем, что при монтаже системы длина горизонтального участка зависит от месторасположения вытяжной решетки и вентиляционной шахты, для унификации полученной схемы предлагается производить нагрев вертикальной части канала и отвода (Рис. 5).

### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для валидации полученных результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования. Экспериментальная модель представляет собой спутник вентиляционного канала, изготовленного из оцинкованной стали (Рис.6). Снаружи воздуховода с помощью спиральной прокладки с шагом 90мм закрепляется нагревательный резистивный кабель. Подключение кабеля к сети производится через терморегулятор, с помощью которого происходит регулирование расчетной разницы температур. Для контроля условной температуры на внутренней стенке вентиляционного канала используется температурный датчик.

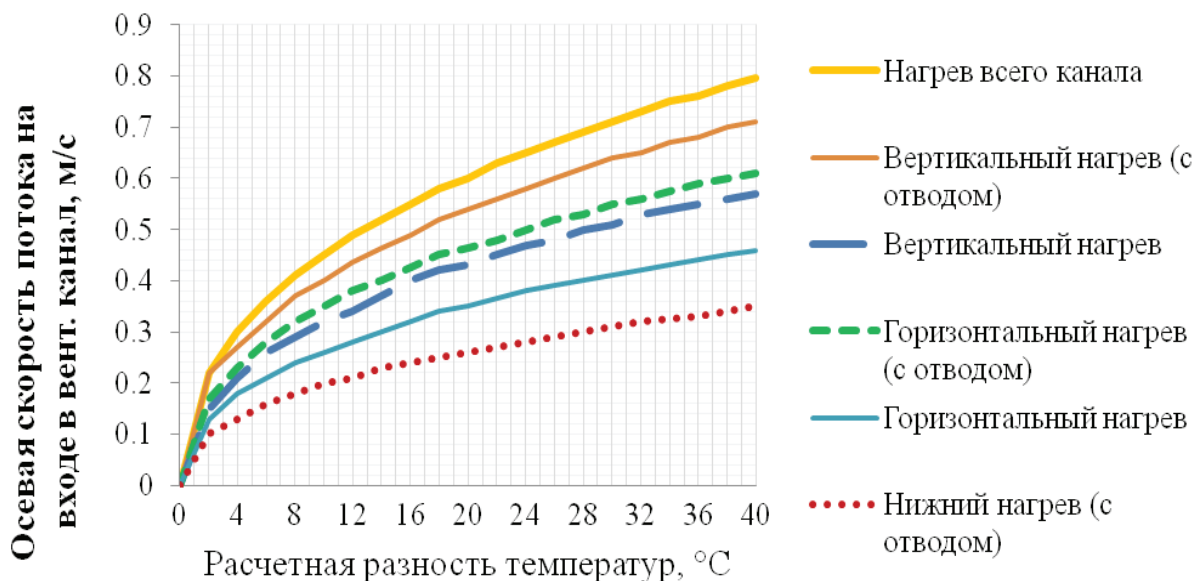


Рисунок 4 – Графики зависимости осевой скорости потока на входе в вентиляционный канал от расчетной разницы температур при различных способах нагрева  
Illustration 4 – Axial exhaust velocity in terms of the temperature difference for various heating methods

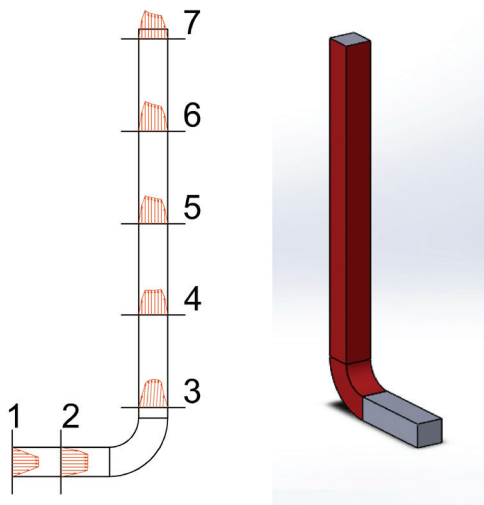


Рисунок 5 – Профили скоростей в расчетных сечениях для вентиляционного канала с вертикальным подогревом совместно с отводом  
Illustration 5 – The velocity profiles in the calculated sections for the vertical duct with vertical heating (with elbow)

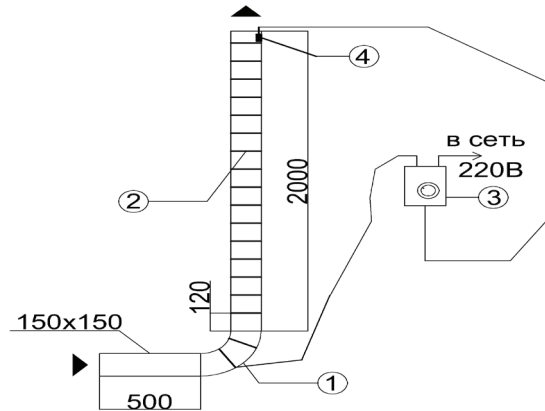


Рисунок 6 – Схема экспериментальной модели:  
1 – вентиляционный канал; 2 – нагревательный резистивный кабель;  
3 – электронный терморегулятор; 4 – датчик температуры  
Illustration 6 – Experimental model scheme:  
1 – ventilation canal; 2 – heating resistive cable;  
3 – electrical thermoregulator; 4 – temperature sensor

Измерения осевой скорости на входе в вентиляционный канал проводились с помощью многофункционального прибора Testo AG 435-4, оборудованного зондом с обогреваемой струной со встроенным сенсором температуры и влажности на телескопической рукоятке. На момент измерений температура внутреннего воздуха в помещении составляла 20 °С.

Графики показывают достаточно высокую сходимость результатов численного моделирования и экспериментальных исследований (невязка составила менее 5%). Увеличение отклонения полученных экспериментальных

значений наблюдается при расчетной разности температур выше 25 °С, что связано со сложностью равномерного прогрева вентиляционного канала до высоких температур.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие системы вентиляции с тепловым побуждением обладают рядом недостатков, которые являются препятствием к их применению в многоэтажных жилых домах в странах с холодным климатом. В результате проведенного математического моделирования, было выявлено, что наиболее эф-

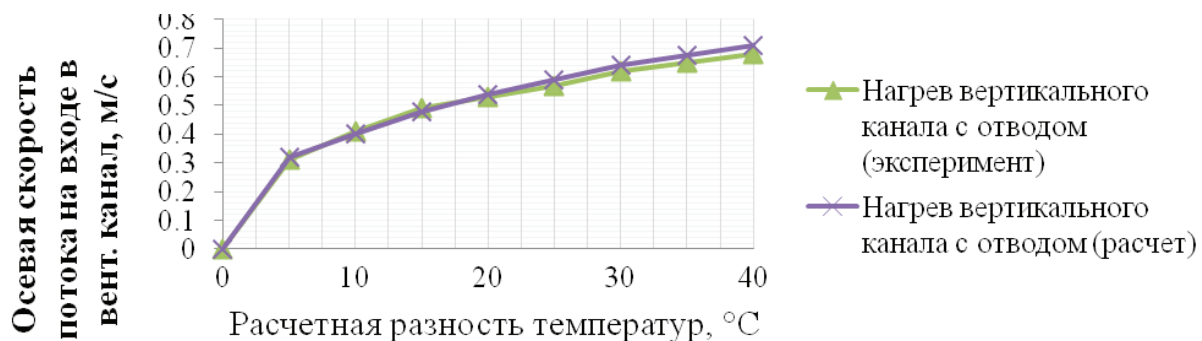


Рисунок 7 – Графики осевой скорости на входе в вентиляционный канал, полученные при проведении численного моделирования и эксперимента  
Illustration 7 – Axial exhaust velocity obtained during numerical simulation and experiment



фективным и удобным в монтаже методом побуждения является вертикальный нагрев вентиляционного канала совместно с отводом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонов В.П. Естественная вентиляция с побуждением // АВОК. 2006. № 3. С. 46 – 55.
2. Engel P.VD., Kemperman R., Doolaard H. Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind / P. VD. Engel, R. Kemperman, H. Doolaard // REHVA Journal 2012. №4. pp. 25 – 32.
3. Цаканян О.С., Голощапов В. Н., Кравченко О. В. Свободно-конвективное движение среды в вертикально расположенном канале с дискретными источниками теплоты // Проблемы машиностроения. 2013. Т. 16. № 2. С. 19 – 29.
4. Рымаров А.Г., Абрамкина Д.В. Системы естественной вентиляции с тепловым побуждением // Научное обозрение. 2016. № 9. С. 43 – 46.
5. Wang L., Li N. Valuation of buoyancy-driven ventilation in respect of energy utilization // Energy and Buildings, 2010, Vol. 42, no 2, pp. 221 – 229.
6. Bansal N.K. Solar chimney for enhanced stack ventilation // Building and environment, 1993, Vol. 28, no 3, pp. 373 – 377.
7. Bansal N.K. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings // Building and Environment, 1994, Vol.29, no 4. pp. 495 – 500.
8. Hirunlabh J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation // Building and Environment. 2001. Vol. 36. no 3. pp. 383 – 391.
9. Lal S. Solar chimney: a sustainable approach for ventilation and building space conditioning // International Journal of Development and Sustainability, 2013, Vol. 2, no 1, pp. 277 – 279.
10. Mehani I., Settou N. Passive Cooling of Building by using Solar Chimney // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2012, Vol. 6, no 9, pp. 735 – 736.
11. Gan G. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery // Applied Thermal Engineering, 1998, Vol. 18, no 12, pp. 1171 – 1187.
12. Белова Е.М. Здание биоклиматической архитектуры – «Городские ворота Дюссельдорфа» // АВОК. 2006. № 3. С. 20-29.
13. Kleiven T. Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities: PhD thesis / Tommy Kleiven – Norwegian University of Science and Technology, 2003. 305 p.
14. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М. : Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1989. 320 с.
15. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М. – Л. : ГИТТЛ, 1952. 286 с.
16. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю., Марковский М.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в прямоугольном кабельном канале // ВЕСТНИК ПНИПУ. 2014. № 11. С. 55 – 66.
17. Obula Reddy Kummitha, Pandey K.M. Experimental and numerical analysis of forced convection heat transfer in turbulent flows / Obula Reddy Kummitha, K.M. Pandey // Procedia Engineering – 2015. - №127. – p. 711-718.
18. Машенков А.Н., Косолапов Е.А. О методах численного решения двумерных уравнений Буссинеска для свободной конвекции. // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 292 – 296.
19. Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54 № 4. С. 86 – 95.
20. Варапаев В.Н. Математическое моделирование комбинированного теплообмена при естественной конвекции воздуха в незамкнутых областях // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 248 – 254 .

## THE PECULIARITIES OF THERMAL INDUCEMENT VENTILATION SYSTEMS

D. V. Abramkina

#### ANNOTATION

**Introduction.** For increasing the efficiency of natural ventilation systems, it is possible to use the thermal incentives - additional heating of the exhaust ventilation duct, which allows to expand temperature difference between ambient and exhaust air and to increase the circulation effect. This method enables stable air exchange in hot period, independently of the wind direction force. However, existing systems have several limitations of application in the high-rise apartment building in countries with a cold climate. The aim of the study is to develop a thermal inducement ventilation systems, suitable for typical residential apartment buildings in russian climate.

**Results.** The article theoretically proves the disadvantages of existing thermal inducement ventilation systems. The article also presents the results of numerical modeling of natural convection currents in the high-rise apartment building. The dependence of outlet velocity on temperature difference for various heating methods is proved on the basis of the research.

**Conclusion.** The results of the research illustrate the high level of the heating area location influence on free convection currents in vent duct.

**KEYWORDS:** thermal inducement, natural ventilation, air circulation, natural convection, convection streams.

**REFERENCES**

1. Kharitonov V.P. Estestvennaya ventilatsiya s pobuzhdeniem [Natural ventilation with motivation]. AVOK, 2006, no 3, pp. 46 – 55.

2. Engel P.V.D., Kemperman R., Doolaard H. Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind / P. V.D. Engel, R. Kemperman, H. Doolaard // REHVA Journal – 2012. - №4. – pp. 25-32.

3. Tsakanyan O.S., Goloshchapov V.N., Kravchenko O.V. Svobodno-konvektivnoe dvizhenie sredi v vertikal'no raspolozhenom kanale s diskretnymi istochnikami teploty [Free-convective motion of the medium in a vertically located channel with discrete heat sources]. Problemy mashinostroeniya, 2013, Vol.16, no 2, pp. 19 – 29.

4. Rymarov A.G., Abramkina D.V. Sistemy estestvennoi ventilatsii s teplovym pobuzhdeniem [Natural ventilation systems with thermal motivation]. Nauchnoe obozrenie, 2016, no 9, pp. 43 – 46.

5. Wang L., Li N. Valuation of buoyancy-driven ventilation in respect of energy utilization // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42. – No. 2. – pp. 221–229.

6. Bansal N.K. Solar chimney for enhanced stack ventilation / N.K. Bansal, R. Mathur, M. Bhandari // Building and environment – 1993. – Vol. 28. - № 3. – pp. 373-377.

7. Bansal N.K. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings // Building and Environment – 1994. – Vol.29. - №4. – pp. 495-500.

8. Hirunlabh J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation / J. Hirunlabh // Building and Environment – 2001. - Vol. 36. - № 3. - pp. 383-391.

9. Lal S. Solar chimney: a sustainable approach for ventilation and building space conditioning / S. Lal, S.C. Kaushik, P.K. Bhargav // International Journal of Development and Sustainability – 2013. – Vol.2. - № 1. – pp. 277-279

10. Mehani I., Settou N. Passive Cooling of Building by using Solar Chimney // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. – 2012. – Vol. 6. – No. 9. – pp. 735–736.

11. Gan G. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery // Applied Thermal Engineering. – 1998. – Vol. 18. – No. 12. – pp. 1171–1187.

12. Belova E.M. Zdanie bioklimaticheskoi arkhitektury – «Gorodskie vorota Dyussel'dorfa» [Building of bioclimatic architecture - «City gate of Dusseldorf»]. AVOK, 2006, no 3, pp. 20 – 29.

13. Kleiven T. Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities: PhD thesis / Tommy Kleiven – Norwegian University of Science and Technology, 2003. – 305 p.

14. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M., Nepomnyashchii A.A. Ustoichivost' konvektivnykh techenii [Stability of convective currents]. Nepomnyashchii, Moscow, Nauka, 1989. 320 p.

15. Ostroumov G.A. Svobodnaya konvektsiya v usloviyakh vnutrennei zadachi [Free convection under internal conditions] / G.A. Ostroumov. – M.-L.: GITTL, 1952. – 286 p.

16. Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu., Markovskii M.V. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teplomassoperenosa v pryamougol'nom kabel'nom kanale. [Mathematical modeling of non-stationary processes of heat and mass transfer in a rectangular cable channel]. VESTNIK PNIPU, 2014, no 11, pp. 55 – 66.

17. Obula Reddy Kummitha, Pandey K.M. Experimental and numerical analysis of forced convection heat transfer in turbulent flows / Obula Reddy Kummitha, K.M. Pandey // Procedia Engineering – 2015. - №127. – pp. 711-718.

18. Mashenkov A.N., Kosolapov E.A. O metodakh chislennogo resheniya dvumernykh uravnenii Bussineska dlya svobodnoi konveksii. [Methods for the numerical solution of the two-dimensional Boussinesq equations for free convection]. Academia, Arkhitektura i stroitel'stvo, 2010, no 3, pp. 292 – 296.

19. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Estestvennaya konvektsiya v zamknutom parallelepipede pri nalichii lokal'nogo istochnika energii. [Natural convection in a closed parallelepiped in the presence of a local energy source]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, 2013, Vol. 54, no 4. pp. 86 – 95.

20. Varapaev V.N. Matematicheskoe modelirovanie kombinirovannogo teploobmena pri estestvennoi konveksii vozdukh v nezamknutykh oblastiakh [Mathematical modeling of combined heat transfer in natural convection of air in nonclosed areas]. Vestnik MGSU, 2010, no 1, pp. 248 – 254 .

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

*Абрамкина Дарья Викторовна* (г. Москва, Россия) – аспирант, ResearcherID: V-5307-2017, ассистент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (129337, Ярославское шоссе, д. 26, тел.: +7 (499) 188-36-07, e-mail: dabramkina@ya.ru).

*Abramkina Darya Viktorovna* (Moscow, Russia) – PhD student, ResearcherID: V-5307-2017, Lecturer, Department of Ventilation and Heat and Gas Supply, University of civil engineering (NRU MGSU) 129337, 26, Yaroslavl'skoe shosse, Russia, Moscow, e-mail: dabramkina@ya.ru).

УДК 624.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ И СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ПОДЗЕМНЫХ ПЕРЕХОДОВ С НИЖНЕЙ СВОДЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**А.А. Комлев, С.А. Макеев, Ю.В. Краснощеков**  
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

**АННОТАЦИЯ**

*В статье рассмотрены варианты применения профилированного настила в качестве несъемной опалубки в монолитных и сборно-монолитных конструкциях перекрытий. Описаны*