

Для цитирования: Абрамкина Д.В. Моделирование свободноконвективных течений в системах вентиляции с тепловым побуждением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (3):136-145. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-136-145

For citation: Abramkina D.V. Simulation of free current flows in buoyancy-driven ventilation systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (3):136-145. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-136-145

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.952.2

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-136-145

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ С ТЕПЛОВЫМ ПОБУЖДЕНИЕМ

Абрамкина Д.В.

*Национальный исследовательский Московский строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,
e-mail: dabramkina@ya.ru*

Резюме: *Цель.* Главной целью исследования является анализ влияния конструкции и способов подогрева вентиляционного канала системы с тепловым побуждением на формирование свободных конвективных течений воздуха в нем. **Метод.** Исследование свободной конвекции в условиях внутренней задачи проводилось с помощью программного обеспечения CFD, основанного на методе конечного объема с неструктурированной сеткой. В качестве расчетного инструмента исследования использовалась программа AnsysFluent, имеющая высокий уровень сходимости численных решений и натурных измерений конвективных течений. Для оценки достоверности полученных результатов используется процедура валидации, которая позволяет определить, насколько точно выбранная концептуальная модель описывает исследуемое течение путем сравнения экспериментальных и численных данных. **Результат.** В статье представлены результаты численного моделирования свободноконвективных потоков, возникающих в нагреваемом канале системы вентиляции последнего этажа многоэтажного жилого здания. В ходе исследования были выявлены зависимости скорости движения воздуха на входе в вентиляционный канал от расчетной разницы температур $\theta, ^\circ\text{C}$ при различных способах нагрева. При расчетной разнице температур $\theta > 20 ^\circ\text{C}$ наблюдается постепенное увеличение расхождения результатов численного моделирования и эксперимента. Данное явление связано с тем, что при увеличении температуры кабеля достичь равномерного прогрева вентиляционного канала в реальных условиях достаточно трудно, что особенно заметно при рассмотрении варианта с нагревом вертикальной части воздуховода и отвода. При этом максимальное отклонение полученных результатов составляет 4,4%. Представленные профили скоростей в расчетных сечениях показывают влияние вентиляционного отвода на характер движения потоков воздуха. **Вывод.** Одним из недостатков существующих систем естественной вентиляции жилых зданий является низкая эффективность работы в теплый и переходный периоды года, особенно в помещениях санитарных узлов. Применение теплового побуждения с вертикальным подогревом вентиляционного канала совместно с отводом позволяет обеспечить стабильный воздухообмен в помещениях.

Ключевые слова: свободная конвекция, тепловое побуждение, вентиляция, микроклимат, воздухообмен

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

SIMULATION OF FREE CURRENT FLOWS IN BUOYANCY-DRIVEN
VENTILATION SYSTEMS

Abramkina D.V.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
26 Yaroslavskoye highway, Moscow 129337, Russia,
e-mail: dabramkina@ya.ru

Abstract Objectives. The aim of the study is to analyse the effect of the design and methods for heating the ventilation duct of a buoyancy-driven system on the formation of free convective air currents in it. **Methods.** The study of free convection under the conditions of interior problem was carried out using the CFD software, based on the finite volume method with unstructured grid. Ansys Fluent software was used as a calculation tool in the study, due to its having a high convergence of numerical solutions offering full-scale measurements of convective currents. To evaluate the reliability of the results obtained, a validation procedure was carried out, allowing us to determine how accurately the selected conceptual model describes the investigated flow through a comparison of experimental and numerical data. **Results.** The results of numerical modelling of free convective currents occurring in the heated channel of the ventilation system of the top floor of a multi-storey residential building are presented in the article. In the course of the study, the air velocity at the entrance to the ventilation duct was found to depend on the calculated temperature difference θ °C for various heating methods. A gradual increase in the discrepancy between the numerical simulation and experimental results is observed if the calculated temperature difference $\theta > 20$ °C. This phenomenon is due to the fact that with increased duct temperature, it is quite difficult to achieve even heating under actual conditions; this is especially noticeable when considering the variant when the vertical part of the vent duct and the take-off are both heated. The maximum deviation of the results is 4.4%. The obtained velocity profiles in the calculated sections indicate the impact of the ventilation take-off on the nature of the air flow motion. **Conclusion.** One of the drawbacks of the existing systems of natural ventilation of residential buildings is the low efficiency of work in the warm and transitional periods of the year, especially in bathrooms. The use of buoyancy-driven ventilation with vertical heating of the vent duct combined with the take-off allows a stable air exchange in the rooms to be provided.

Keywords: free convection, buoyancy-driven, ventilation, microclimate, air exchange

Введение. Существующие каналные системы естественной вентиляции жилых зданий обладают рядом недостатков. Если в холодный период года естественная вентиляция в полной мере обеспечивает создание и поддержание требуемых параметров внутреннего микроклимата в помещении, то в теплый и переходный периоды (при температуре наружного воздуха выше 5°C) работа систем оказывается нестабильной [1].

Фактически, в данное время года, вентиляция квартир осуществляется в основном за счет организации естественного проветривания, однако, данный подход порождает проблему поддержания расчетного воздухообмена в помещениях санитарных узлов [2]. Кроме того, установка осевых вентиляторов, сплит-систем и современных пластиковых окон значительно меняет аэродинамику естественной вентиляции, тем самым порождая целый ряд проблем: возникновение обратной тяги, ухудшение качества внутреннего воздуха, образование грибков и плесени в санитарном узле.

Для обеспечения стабильной работы естественной вентиляции типовых многоэтажных зданий используются специализированные методики, принципы работы которых, можно разделить на три группы: гибридные системы [3-4], системы с ветровым [5-6] и тепловым побуждением [7]. До настоящего момента, в современных научных исследованиях, касающихся теплового побуждения систем вентиляции [8-11] рассматривались исключительно системы с радиа-

ционным подогревом вентиляционных каналов. Однако в условиях холодного климата существует ряд препятствий, которые зачастую приводят данную систему в нерабочее состояние [12]. В данной статье представлен метод теплового побуждения канальных систем вентиляции, на основе которого было проведено численное моделирование свободноконвективных течений с целью определения наиболее эффективных способов подогрева вентиляционного канала.

Постановка задачи. В настоящее время в современных многоэтажных монолитных жилых домах проектируются системы естественной вентиляции с вертикальным сборным каналом, выполненные из стальных воздуховодов прямоугольного и круглого сечения.

Загрязненный воздух из помещения через вытяжную решетку поступает в ответвление вентиляционного канала, называемого «спутником», и далее в междуэтажном перекрытии над следующим этажом перепускается в магистральный сборный канал – «ствол» [13]. При этом последний и предпоследний этаж, имеют собственную, отдельную систему. Квартиры, расположенные на последних этажах находятся в наиболее сложной ситуации с точки зрения аэродинамики естественной вентиляции, вследствие низкого уровня располагаемого напора, зависящего от длины вентиляционного канала. Таким образом, в качестве расчетной модели для исследования свободной конвекции была принята система последнего этажа.

Физическая постановка задачи исследования: рассматривается формирование свободноконвективных течений в незамкнутой ограниченной области Ω_1 , возникающее за счет наличия пространственной неоднородности плотности, вызванной неоднородностью температуры (рис. 1).

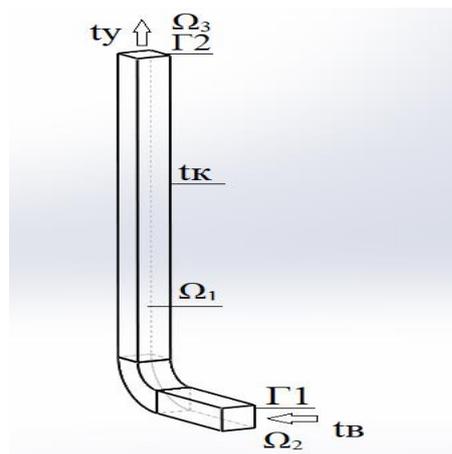


Рис.1 Схема расчетной модели
 Fig.1 Scheme of the calculation model

Γ_1 является входным сечением, через которое воздух из помещения (область Ω_2) с температурой t_b и давлением P_b поступает в канал. Γ_2 – выходной сечение, через которое воздух с температурой t_y удаляется в атмосферу (Ω_3). Условная температура на стенке вентиляционного канала принимается равной t_k .

Методы исследования. Представленная задача формирования свободно конвективных течений описывается уравнениями Обербека-Буссинеска [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \cdot v = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} \right) + v \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + g \cdot \beta \cdot T \\ v \cdot \left(\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + \frac{\partial T_z}{\partial z} \right) = \chi \cdot \left(\frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

где, v - скорость движения воздушного потока, м/с;
 p - конвективная добавка к гидростатическому давлению, соответствующему средним температуре и плотности, Па;
 $\bar{\rho}$ - средняя плотность, кг/м³;

T - температура, отсчитываемая от некоторого среднего значения, К;

g - ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

ν и χ - коэффициенты кинематической вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$) и температуропроводности ($\text{м}^2/\text{с}$), предполагаемые постоянными;

β - объемный коэффициент теплового расширения, $1/\text{К}$.

Основные предположения, используемые для построения математической модели:

1. Движение воздуха в канале, обусловленное наличием свободной конвекции, возникает из-за разности плотностей воздуха в помещении и в рассматриваемой области вентиляционного канала Ω_1 ;
2. Предполагается, что неоднородности плотности, вызванные неоднородностью давления малы, и ими можно пренебречь [15]. Возникновение конвективных течений определяет наличие теплового расширения воздушных масс у нагретых поверхностей.

Для описания зависимости плотности от температуры используется линейная аппроксимация [15]:

$$\rho = \bar{\rho} \cdot (1 - \beta \cdot \Delta T), \quad (2)$$

где, ΔT – отклонение температуры от равновесного состояния.

4. Воздух в канале прозрачен для теплового излучения стенок;

5. Воздух во внешних областях Ω_2 и Ω_3 покоится, а распределение давлений в них определяется гидростатикой [16];

6. Задача является стационарной;

7. Режим движения воздуха является ламинарным;

8. В связи с тем, что в уравнение Обербека - Буссинеска входит величина действующего давления, представляющая собой разность действительного и гидростатического давления, то во входном сечении Γ_1 и выходном сечении Γ_2 задается условие $p = 0$ [16].

В качестве расчетного инструмента исследования использовалась программа AnsysFluent, имеющая высокий уровень сходимости численных решений и натуральных измерений конвективных течений [17-19].

Обсуждение результатов. Одним из основных искомых параметров численного моделирования являлась скорость движения воздуха на входе в вентиляционный канал v_1 , м/с (рис.2). Как показали проведенные исследования, v_1 значительно зависит от расчетной разности температур $\theta = t_k - t_b$, $^\circ\text{C}$.

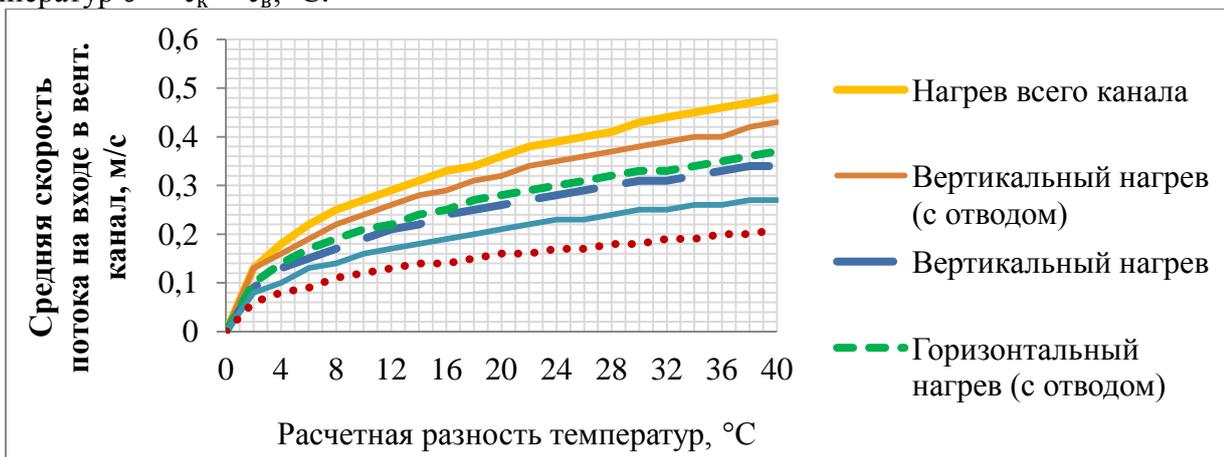


Рис.2. Графики зависимости средней скорости на входе в вентиляционный канал v_1 , м/с при различных способах его нагрева в зависимости от расчетной разности температур θ , $^\circ\text{C}$
 Fig. 2. Graphs of the dependence of the average velocity at the inlet to the ventilation channel v_1 , m/s , for various methods of heating it, depending on the calculated temperature difference θ , $^\circ\text{C}$

Исходя из представленных графиков (рис.2), можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом теплового 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.

Согласно [20], при конструировании системы естественной вентиляции с вертикальным сборным каналом необходимо стремиться к минимальной длине «спутника», но не менее 2м.

На рис.3 и рис.4 представлено сравнение двух расчетных моделей с вертикальным нагревом с отводом (вариант 2) и без него (вариант 1). Длина вертикального участка принималась равной 2м.

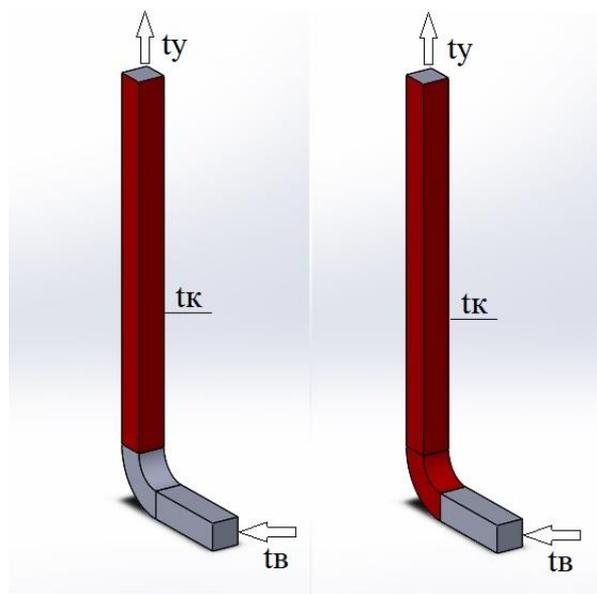


Рис. 3 Схемы вентиляционного канала с вертикальным подогревом:
слева – вариант 1, справа – вариант 2

Fig. 3 Schemes of the ventilation duct with vertical heating:
on the left - option 1, on the right - option 2

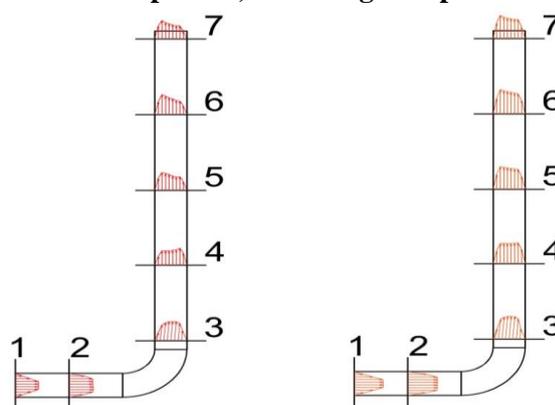


Рис. 4. Профили скоростей для варианта 1 и варианта 2 при расчетной разнице температур $\theta=10^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Speed profiles for option 1 and option 2 for the calculated temperature difference $\theta = 10^{\circ}\text{C}$

Представленные профили скоростей показывают, что дополнительный нагрев отвода позволяет выровнять поток воздуха, проходящий через вентиляционный канал.

Начиная с сечения 4, происходит постепенное формирование развитого конвективного течения, характерной особенностью которого является наличие седлообразного профиля скоростей [12], который возникает в связи с тем, прогрев пристеночных слоев происходит быстрее, чем ядра потока.

Для оценки достоверности полученных результатов используется процедура валидации, которая позволяет определить, насколько точно выбранная концептуальная модель описывает исследуемое течение путем сравнения экспериментальных и численных данных [21].

Экспериментальная установка состоит из стального оцинкованного воздуховода, толщиной 0,5 мм (рис. 5). Нагрев канала осуществляется с помощью резистивной греющей ленты ЭНГЛ-1 (шаг прокладки кабеля составил 90 мм), которая подключается к сети переменного тока через терморегулятор АРТ-18-10Н. Стандартная разница между температурами включения и выключения (гистерезис) терморегулятора составляет 2°C.

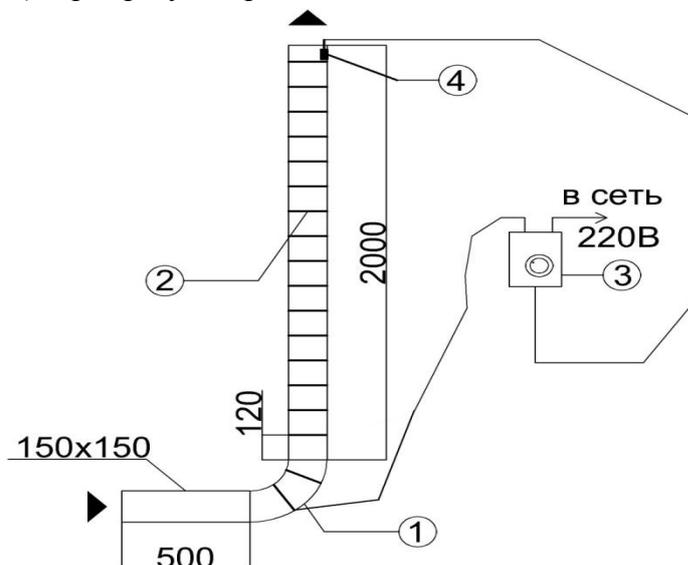


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – воздуховод, 2 – резистивная нагревательная лента, 3 – терморегулятор, 4 – датчик температуры

Fig. 5. Scheme of the experimental installation: 1 - air duct, 2 - resistive heating tape, 3 - temperature controller, 4 - temperature sensor

Для обеспечения максимального контакта между нагревательным кабелем и воздуховодом использовалась самоклеющаяся алюминиевая армированная лента (рис. 6).

На месте контроля температуры был закреплен термоэлектрический датчик КТУ-81-110, позволяющий изменять расчетную разницу температур θ , °C.

Для снижения тепловых потерь, снаружи вентиляционного канала прокладывается теплоизоляционный слой, таким образом, чтобы «холодный конец» кабеля оставался снаружи.



Рис.6. Фото экспериментальной установки

слева: прокладка резистивного греющего кабеля ЭНГЛ-1, справа: фиксация кабеля с помощью армированной ленты

Fig.6. Photo of the experimental setup

On the left: the laying of the resistance heating cable ENGL-1, on the right: fixing the cable with reinforced tape

Измерение осевой скорости и температуры воздушного потока на входе и выходе из вентиляционного канала производилось с помощью многофункционального прибора Testo AG 435-4, оборудованного зондом с обогреваемой струной со встроенным сенсором температуры и влажности на телескопической рукоятке. Модель прибора внесена в Государственный Реестр Средств измерений РФ.

При расчетной разнице температур $\theta > 20$ °С наблюдается постепенное увеличение расхождения результатов численного моделирования и эксперимента (рис.7).

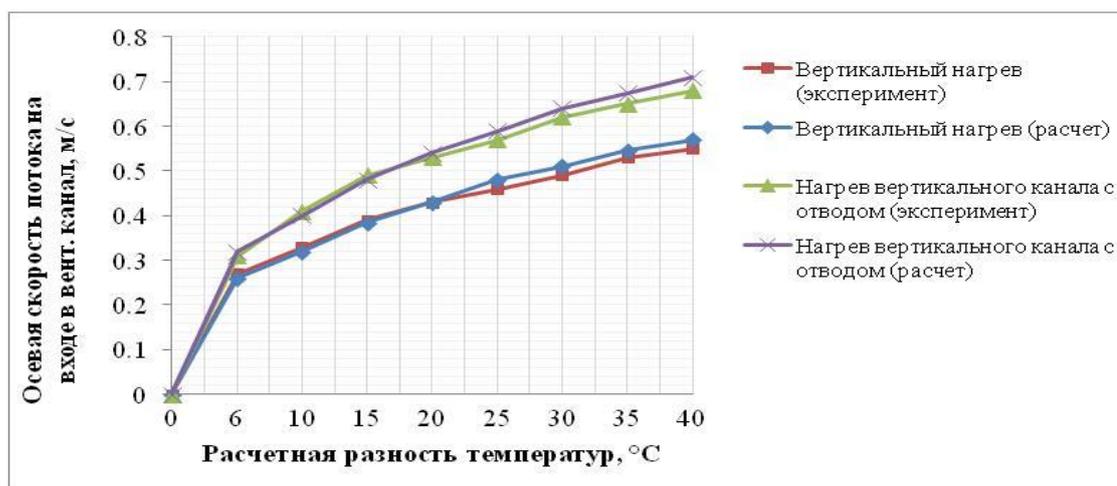


Рис.7. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента. Графики осевой скорости потока на входе в вентиляционный канал при различных способах нагрева в зависимости от расчетной разности температур
Fig.7. Comparison of the results of numerical simulation and experiment. Graphs of the axial flow velocity at the inlet to the ventilation duct for various heating methods depending on the calculated temperature difference

Данное явление связано с тем, что при увеличении температуры кабеля достичь равномерного прогрева вентиляционного канала в реальных условиях достаточно трудно, что особенно заметно при рассмотрении варианта с нагревом вертикальной части воздуховода и отвода. При этом максимальное отклонение полученных результатов составляет 4,4%.

Вывод. Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать вывод как о достоверности результатов экспериментов в рассматриваемом диапазоне значений основных параметров, так и о возможности CFD моделирования свободноконвективных течений в условиях внутренней задачи.

Из проведенных теоретических исследований, можно сделать вывод, что существующие системы естественной вентиляции жилых зданий не способны обеспечить требуемый микроклимат в помещении в течение всего года.

Тепловое побуждение является одной из технологий повышения эффективности работы систем вентиляции.

Численное моделирование канальной системы вентиляции с тепловым побуждением показало, что вертикальный нагрев канала совместно с отводом, с одной стороны позволяет создать стабильный поток воздуха, с другой стороны, является наиболее удобным при монтаже системы.

Библиографический список:

1. Ватин Н.И. Системы вентиляции жилых помещений многоквартирных домов: учебное пособие. / Н.И. Ватин, Т.В. Самопляс. – СПб.: Изд. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2004. – 66 с.
2. Ливчак И.Ф. Вентиляция многоэтажных жилых зданий / И.Ф. Ливчак, А.Л. Наумов. - М.: АВОК-Пресс, 2005. – 133 с.
3. CIBSE - Mixed mode ventilation: CIBSE applications manual AM 13. - London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2000. – 77p.
4. Бобровицкий И.И., Шилкин Н.В. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых зданиях. / И.И. Бобровицкий, Н.В. Шилкин // АВОК – 2003. - №10. – с. 16-27.
http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4573

5. T. van Hooff. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. / T. van Hooff, B. Blocken, L. Aanen, B. Bronsema // *Building and Environment* – 2011. - № 46. – p. 1797-1807. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000576>
6. Kleiven T. Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities: PhD thesis / Tommy Kleiven – Norwegian University of Science and Technology, 2003. – 305 p. https://www.researchgate.net/profile/Tommy_Kleiven/publication/267243303_Natural_Ventilation_in_Buildings_Architectural_concepts_consequences_and_possibilities/links/544e3c7d0cf26dda088e9459/Natural-Ventilation-in-Buildings-Architectural-concepts-consequences-and-possibilities.pdf
7. Харитонов В.П. Естественная вентиляция с побуждением / В.П. Харитонов // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК) – 2006. - №3. – с. 46-55. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3201
8. Bansal N.K. Solar chimney for enhanced stack ventilation / N.K. Bansal, R. Mathur, M. Bhandari // *Building and Environment* – 1993 – V. 28. № 3. – p. 373-377. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132393900422>
9. Hirunlabh J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation / J. Hirunlabh, S. Wachirapuwadon, N. Pratinthong, J. Khedari // *Building and Environment* – 2001. - Vol. 36 - №. 3. - p. 383-391. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132300000160>
10. 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. – p. 277-279 <https://isdsnet.com/ijds-v2n1-20.pdf>
11. Tongbai P. Enhancement of roof solar chimney performance for building ventilation / P. Tongbai, T. Chitsomboon // *Journal of power and energy engineering* – 2014. - №2. – p. 22-29. https://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014060916330973.pdf
12. Рымаров А.Г., Абрамкина Д.В. Системы естественной вентиляции с тепловым побуждением / А.Г. Рымаров, Д.В. Абрамкина // *Научное обозрение* – 2016. №9 – с. 43-46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26206445>
13. Малявина Е.Г., Китайцева Е.Х. Естественная вентиляция жилых зданий / Е.Г. Малявина, Е.Х. Китайцева // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК) – 1999. - № 3. – с. 35-43. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=67
14. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи / Г.А. Остроумов. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. – 286 с.
15. Гершуни Г.З. Устойчивость конвективных течений / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий, А.А. Непомнящий. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 320 с.
16. Варапаев В.Н. Математическое моделирование задач внутренней аэродинамики и теплообмена зданий / В.Н. Варапаев, Е.Х. Китайцева. – М.: Изд. СГА, 2008. – 337 с.
17. Кузнецов Г.В. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии. / Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, М.А. Шеремет // *Прикладная механика и техническая физика* – 2013 – Т. 54 № 4. – с. 86-95. <http://www.sibran.ru/upload/iblock/3a3/3a3fe0339a7a2861ffedf697d79a4e8f.pdf>
18. 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. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815037352>
19. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю., Марковский М.В. Математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса в прямоугольном кабельном канале. / Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, М.В. Марковский // *ВЕСТНИК ПНИПУ* – 2014. - № 11. – с. 55-66. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-estestvennoy-i-vynuzhdennoy-ventilyatsii-na-protsessy-protokayuschiv-kabelnom-kanale>
20. Справочное пособие к СНиП 2.08.01-89. Отопление и вентиляция жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1990. - 19с.
21. Харитонов А.М. О верификации и валидации моделей и методов численного моделирования пространственных течений. / А.М. Харитонов // *Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика»*, Новосибирск, 30 мая – 4 июня 2011 г. – 2011. – с.1-7.

References:

1. Vatin N.I., Samoplyas T.V. Sistemy ventilyatsii zhilykh pomeshcheniy mnogokvartirnykh domov: uchebnoe posobie. S-Pb.: Izd. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet; 2004. 66 s. [Vatin N.I., Samoplyas T.V. Ventilation systems for living quarters of apartment buildings: a tutorial. S-Pb.: Izd. St. Petersburg State Polytechnic University; 2004. 66 p. (In Russ.)]

2. Livchak I.F., Naumov A.L. Ventilyatsiya mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy. M.: AVOK-Press; 2005. 133 s. [Livchak I.F., Naumov A.L. Ventilation of multi-storey residential buildings. M.: ABOK-Press; 2005. 133 p. (In Russ.)]
3. CIBSE - Mixed mode ventilation: CIBSE applications manual AM 13. London: Chartered Institution of Building Services Engineers; 2000. 77p.
4. Bobrovitskiy I.I., Shilkin N.V. Gibrnaya ventilyatsiya v mnogoetazhnykh zhilykh zdaniyakh. ABOK. 2003; 10:16-27. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4573 [Bobrovitskiy I.I., Shilkin N.V. Hybrid ventilation in multi-storey residential buildings. ABOK. 2003;10:16-27. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4573 (In Russ.)]
5. Van Hooff T., Blocken B., Aanen L., Bronsema B. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. Building and Environment. 2011; 46:1797-1807. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000576>
6. Kleiven T. Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities: PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2003. 305 p. https://www.researchgate.net/profile/Tommy_Kleiven/publication/267243303_Natural_Ventilation_in_Buildings_Architectural_concepts_consequences_and_possibilities/links/544e3c7d0cf26dda088e9459/Natural-Ventilation-in-Buildings-Architectural-concepts-consequences-and-possibilities.pdf
7. Kharitonov V.P. Estestvennaya ventilyatsiya s pobuzhdeniem. Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (ABOK). 2006;3:46-55. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3201 [Kharitonov V.P. Natural buoyancy-driven ventilation. Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics (ABOK). 2006;3:46-55. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3201 (In Russ.)]
8. Bansal N.K., Mathur R., Bhandari M. Solar chimney for enhanced stack ventilation. Building and environment. 1993;28(3):373-377. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132393900422>
9. Hirunlabh J., Wachirapuwadon S., Pratinthong N., Khedari J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. Building and Environment. 2001; 36(3):383-391. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132300000160>
10. Lal S., Kaushik S.C., Bhargav P.K. Solar chimney: a sustainable approach for ventilation and building space conditioning. International Journal of Development and Sustainability. 2013;2(1):277-279. <https://isdsnet.com/ijds-v2n1-20.pdf>
11. Tongbai P., Chitsomboon T. Enhancement of roof solar chimney performance for building ventilation. Journal of power and energy engineering. 2014; 2:22-29. https://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014060916330973.pdf
12. Rymarov A.G., Abramkina D.V. Sistemy estestvennoy ventilyatsii s teplovym pobuzhdeniem. Nauchnoe obozrenie. 2016;9:43-46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26206445> [Rymarov A.G., Abramkina D.V. Natural buoyancy-driven ventilation systems. Scientific Review. 2016; 9:43-46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26206445> (In Russ.)]
13. Malyavina E.G., Kitaytseva E.Kh. Estestvennaya ventilyatsiya zhilykh zdaniy. Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (ABOK). 1999;3:35-43. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=67 [Malyavina E.G., Kitaytseva E.Kh. Estestvennaya ventilyatsiya zhilykh zdaniy. Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (ABOK). 1999; 3:35-43. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=67 (In Russ.)]
14. Ostroumov G.A. Svobodnaya konvektsiya v usloviyakh vnutrenney zadachi. M.-L.: GITTL; 1952. 286 s. [Ostroumov G.A. Free convection under the conditions of interior problem. M.-L.: GITTL; 1952. 286 p. (In Russ.)]
15. Gershuni G.Z., Zhukhovitskiy E.M., Nepomnyashchiy A.A. Ustoychivost' konvektivnykh techeniy. M: Nauka; 1989. 320 s. [Gershuni G.Z., Zhukhovitskiy E.M., Nepomnyashchiy A.A. Stability of convective currents. M: Nauka; 1989. 320 p. (In Russ.)]
16. Varapaev V.N., Kitaytseva E.Kh. Matematicheskoe modelirovanie zadach vnutrenney aerodinamiki i teploobmena zdaniy. M.: Izd. SGA; 2008. 337 s. [Varapaev V.N., Kitaytseva E.Kh. Mathematical modeling of problems of internal aerodynamics and heat exchange of buildings. M.: Izd. SGA; 2008. 337 p. (In Russ.)]
17. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Estestvennaya konvektsiya v zamknutom parallelepipedе pri nlichii lokal'nogo istochnika energii. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2013;54(4):86-95. <http://www.sibran.ru/upload/iblock/3a3/3a3fe0339a7a2861ffedf697d79a4e8f.pdf> [Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Natural convection in a closed parallelepiped in the presence of a local energy source. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2013; 54(4):86-95. <http://www.sibran.ru/upload/iblock/3a3/3a3fe0339a7a2861ffedf697d79a4e8f.pdf> (In Russ.)]
18. Kummitha O.R., Pandey K.M. Experimental and numerical analysis of forced convection heat transfer in turbulent flows. Procedia Engineering. 2015;127:711-718. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815037352>
19. Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu., Markovskiy M.V. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teplomassoperenosa v pryamougol'nom kabel'nom kanale. VESTNIK PNIPU. 2014;11:55-66. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-estestvennoy-i-vynuzhdennoy-ventilyatsii-na-protsessy-prottekayuschiev-kabel'nom-kanale> [Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu., Markovskiy M.V. Mathematical modeling of non-stationary processes of heat and mass transfer in a rectangular cable channel. PNRPU Bulletin. Electrotechnics,

- Informational Technologies, Control Systems. 2014;11:55-66. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-estestvennoy-i-vynuzhdennoy-ventilyatsii-na-protsessy-protokayuschie-v-kabelnom-kanale> (In Russ.)]
20. Spravochnoe posobie k SNiP 2.08.01-89. Otoplenie i ventilyatsiya zhilykh zdaniy. M.: Stroyizdat; 1990. 19 s. [Reference guide to SNIP 2.08.01-89. Heating and ventilation of residential buildings. M.: Stroyizdat; 1990. 19 p. (In Russ.)]
21. Kharitonov A.M. O verifikatsii i validatsii modeley i metodov chislennogo modelirovaniya prostranstvennykh techeniy. Mezhdunarodnaya konferentsiya "Sovremennye problemy prikladnoy matematiki i mekhaniki: teoriya, eksperiment i praktika", Novosibirsk; 2011. S.1-7. [Kharitonov A.M. On verification and validation of models and methods for numerical modeling of spatial flows. International Conference "Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment and Practice". Novosibirsk; 2011. P.1-7. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

Абрамкина Дарья Викторовна – ассистент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции.

Information about the author:

Darya V. Abramkina - Assistant, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation.

Information about the author:

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 31.07.2017.

Принята в печать 25.08.2017.

Conflict of interest.

The author declares no conflict of interest.

Received 31.07.2017.

Accepted for publication 25.08.2017.