

УДК 697.112.3:620.179.11

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ПНЕВМООПОРНЫХ ОБЪЕКТАХ

Часть 1

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,
докт. техн. наук, проф. АКЕЛЬЕВ В. Д.,
канд. техн. наук МАНЮШИНЕЦ Т. В., асп. КОСТЕВИЧ М. Ф.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Khrustalyov B.M. @tut.by

Выполнено компьютерное моделирование процесса трехмерной конвекции на основании расчетов термодинамических параметров пневмоопорных объектов при вынужденной конвекции воздуха. Разработана математическая модель численного расчета температурных, скоростных, полей давлений воздуха в объекте в системе Solid Works и с помощью программных средств представлена сеточными элементами. Для объекта, где функционируют приточно-вытяжные сечения, через которые транспортируется более и менее нагретый воздух, использованы уравнения Навье – Стокса, сплошности, теплопроводности, Клапейрона – Менделеева. Дифференциальные уравнения представлены системами алгебраических уравнений, начальные и граничные условия заменены разностными условиями для сеточных функций, и их решения выполнены алгебраическими операциями. Показано, что в пневмоопорных объектах конвективные, тепловые потоки идентичны структурам у поверхностей в неограниченном пространстве, а в одно- и многослойных оболочках имеют место циркуляционные контуры, геометрические размеры которых зависят от теплофизических характеристик газа (воздуха) в оболочках, радиационных взаимодействий более и менее нагретых поверхностей оболочек с небосводом, поверхностью земли, соседними объектами. Выполнены натурные обследования пневмоопорных объектов различного назначения (спортивные и складские объекты, дельфинарии и т. д.) в летнее и зимнее время в Минске и других городах Беларуси и России, включающие температурные поля внешних и внутренних поверхностей оболочек воздуха в помещениях, подвижности воздуха, относительные влажности, тепловые потоки, радиационные характеристики и т. д. Результаты аналитических и натуральных исследований иллюстрированы графическими зависимостями скорости, температуры, плотности, давления от координат, времени.

Ключевые слова: моделирование, объект, расчет, схема, уравнение, температура, скорость, давление, поле, время, воздух.

Ил. 6. Библиогр.: 15 назв.

MODELING OF CONVECTIVE FLOWS IN PNEUMOBASED OBJECTS

Part 1

KHRUSTALYOV B. M., AKELYEV V. D.,
MANYUSHINETS T. V., KOSTEVICH M. F.

Belarussian National Technical University

A computer modeling process of three-dimensional forced convection proceeding from computation of thermodynamic parameters of pneumo basic buildings (pneumo supported structures) is presented. The mathematical model of numerical computation method of temperature and velocity fields, pressure profile in the object is developed using the package Solid works and is provided by grid methods on specified software. Special Navier–Stokes, Clapeyron–Mendeleev, continuity and thermal-conductivity equations are used to calculate parameters in the building with four supply and exhaust channels. Differential equations are presented by algebraic equation systems, initial-boundary conditions are changed by differential conditions for mesh functions and their solutions are performed by algebraic operations. In this article the following is demonstrated: in pneumo basic buildings convective and heat flows are identical structures near the surfaces in unlimited space, but in single-multiply shells (envelopes) circulation lines take place, geometrical sizes of which depend on thermal-physical characteristics of gas(air) in envelopes, radiation reaction with heated surfaces of envelopes with sphere, earth surface, neighboring buildings. Natural surveys of pneumo-basic buildings of different purposes were carried out in Minsk, in different cities of Belarus and Russia, including temperature fields of external and internal surfaces of air envelopes, relative humidity, thermal (heat)flows, radiation characteristics and others.

The results of research work are illustrated with diagrams of temperature, velocity, density and pressure dependent on coordinates and time.

Keywords: simulation, object, scheme, equation, temperature, velocity, pressure, time, profile, air, field.

Fig. 6. Ref.: 15 titles.

Введение. Общий подход и структурный алгоритм к данной проблеме изложен в [1–13]. Уменьшение экологических последствий современной энергетики возможно при оптимизации потребления теплоты в сферах деятельности человека. Исследования в этом направлении выполняли в соответствии с государственными программами и проектами 2011–2015 гг. научных исследований в Беларуси сотрудниками БНТУ.

Содержание исследований соответствует отрасли «Технические науки», область исследований – п. III. 2 «Средства, системы и процессы отопления, охлаждения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий различного назначения, включая оптимизацию воздушного, теплового и влажностного режима зданий и сооружений и элементов их конструкции», п. III. 7 «Средства, системы и процессы, предназначенные для оптимизации потребления и экономии тепловой энергии и топлива; оптимизация теплопотребляющих и газопотребляющих систем», п. III. 9 «Тепломассообмен в зданиях, сооружениях и их элементах, в системах транспорта и трансформации тепла. Методы и оптимизация тепловой защиты зданий и различных теплопотребляющих установок оборудования и систем. Методы

расчета энергосбережения в зданиях различного назначения» и п. Ш. 11 «Гидравлика и газодинамика систем и отдельных элементов теплогазоснабжения и вентиляции; аэродинамика помещений и зданий, аэродинамический режим территории застройки; вентиляционные струи».

Идеи реализации пневматических, пневмоопорных конструкций различного назначения были известны уже более тысячи лет назад. Пневматические строительные конструкции могут быть: воздухоопорными вследствие наличия воздуха в объеме объекта, давление в котором компенсирует внешние нагрузки (ветер, атмосферные осадки и т. д.), без деформирования оболочек. К ним относится, например, такая их разновидность, как пневмолинзы (пневмоподушки). Сопротивление несущих элементов (стойки, балки, арки, панели) сжатию и изгибу обеспечивается давлением воздуха (от десятых долей в пневмопанелях до атмосфер для пневмостержней), заключенного в конструктивных элементах. Оболочки воздухоопорных зданий могут быть одно-, двух- и многослойными. Устойчивость двухслойных оболочек, не связанных между собой, зависит от разности давлений воздуха для каждого слоя. Для внешней оболочки, подверженной климатическим воздействиям, она, естественно, больше, чем для внутренней.

Некоторые фото из множества функционирующих в различных странах пневмоопорных объектов представлены на рис. 1 [11–14], где 1 – универсальный спортивный комплекс БГМУ, г. Минск, пр. Дзержинского; 2 – теннисные площадки Sporting Club, г. Минск, пр. Независимости, 193; 3 – футбольный клуб БАТЭ, г. Борисов, Минская обл., Борисовский р-н, д. Дудинки, пневмокаркасное сооружение; 4 – теннисная школа-академия AvanteClub, пр. Рокоссовского, 44, ФОК «Серебрянка», г. Минск; 5 – теннисный центр «Жар над Гроном», г. Жар над Гроном, Словакия; 6 – «Миллениум Групп Лтд. Варна», Болгария; 7 – воздухоопорное сооружение на два теннисных корта, «Дом отдыха Пялово», г. Пялово, Московская обл.; 8 – ледовый каток, г. Бор, Нижегородская область, Россия; 9 – ледовый физкультурно-оздоровительный комплекс «Умка», г. Магнитогорск, Челябинская обл., Россия; 10 – универсальный спортивный комплекс на территории МЧС России, пос. Новогорск, Московская обл.; 11 – крытый теннисный корт, г. Щелково, Московская обл.; 12 – спортивный комплекс с ледовой площадкой, г. Медногорск, Оренбургская обл., Россия; 13 – спортивный комплекс с ледовой площадкой, г. Брянск; 14 – спортивный комплекс с ледовой площадкой, г. Набережные Челны, Респ. Татарстан; 15 – спортивный комплекс с универсальной площадкой, г. Разумное, Белгородская обл., Россия; 16 – спортивное сооружение, г. Нижнекамск, Респ. Татарстан; 17 – хозяйственная постройка, г. Армавир, Краснодарский край; 18 – г. Тамбов; 19 – г. Москва, Красная Площадь, Мавзолей; 20 – ТЦ «Хасанская 19а», 4 ВОК А-класса 2013, г. Санкт-Петербург; 21 – два теннисных корта СК «Волна», г. Санкт-Петербург; 22 – крытый теннисный корт, ТЦ «Династия», г. Санкт-Петербург; 23 – спортивное сооружение, Каменка, г. Санкт-Петербург; 24 – Силичи (летом – спортивный зал, зимой и осенью – каток), Беларусь; 25 – открытая разработка полезных ископаемых под оболочкой, усиленной канатами; 26 – изоляция подоболочного пространства от окружающей среды.

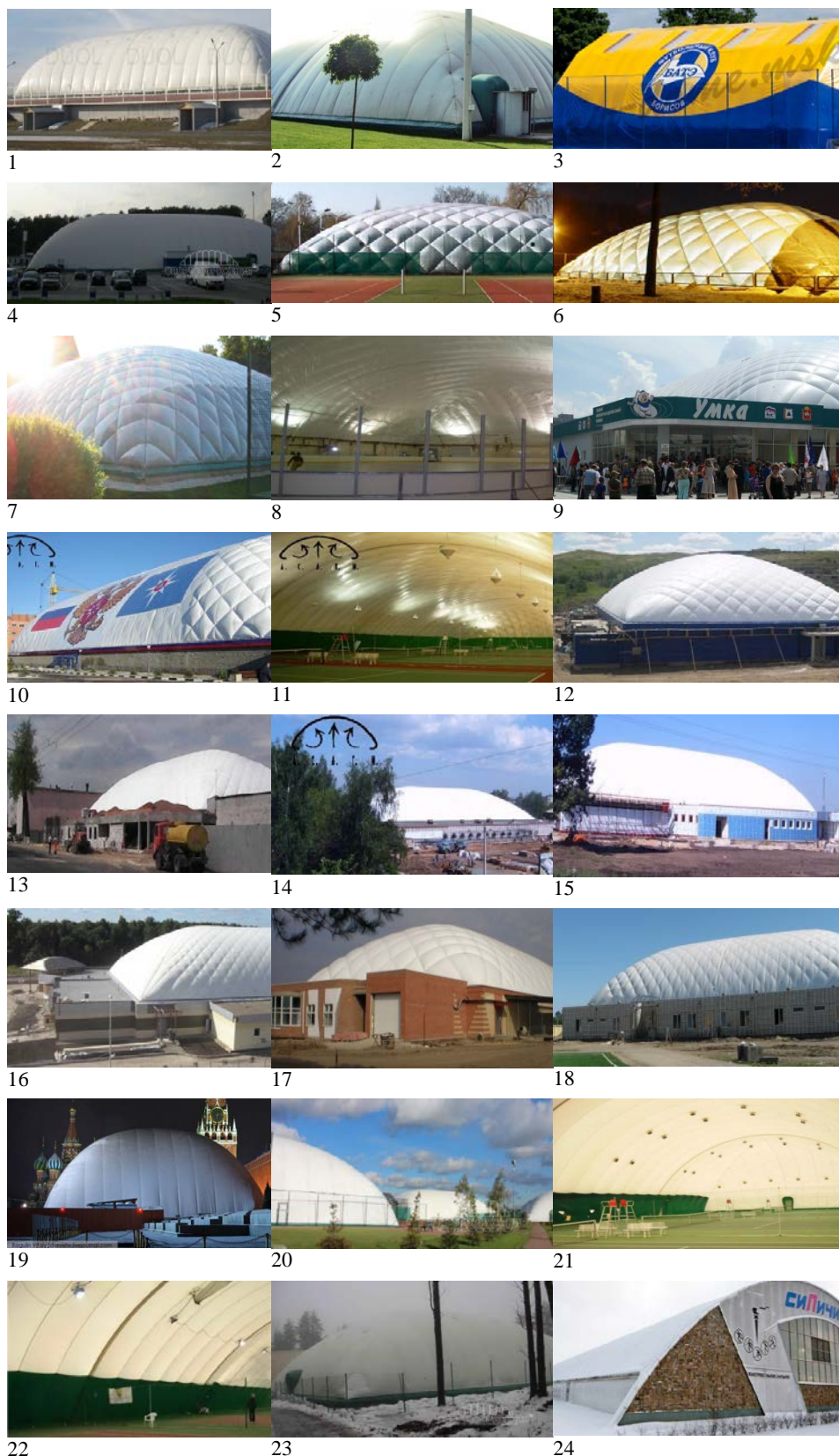
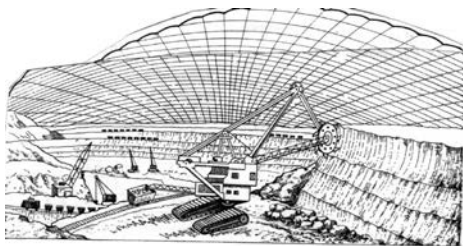
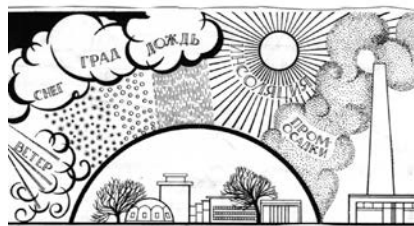


Рис. 1. Схемы и фото пневмоопорных объектов



25



26

Рис. 1. Окончание

Теплоперенос в большинстве объектов связан с температурами поверхностей оболочек, аэродинамикой линий тока в локальных контурах и определяется характерными геометрическими размерами. Конвективные потоки взаимодействуют между собой, зависят от радиационных характеристик поверхностей оболочек, ориентации в пространстве, теплофизических характеристик [2, 9, 15]. Теплопотери при использовании различных конструкций и оболочек характеризуются числами Нуссельта, Рэлея, Прандтля, граничными и начальными условиями, для снижения которых стремятся к оптимизации потоков теплоты и массы.

В странах СНГ на отопление и вентиляцию зданий различного назначения используется энергоресурсов больше, чем в государствах с аналогичными климатическими условиями. В соответствии с нормативными документами недопустимы конденсатообразование и сублимация на внутренних поверхностях оболочек пневмоопорных объектов.

Стоки теплоты и массы в различные интервалы времени суток и года в большинстве строительных пневмоопорных объектов с двух- и многослойными оболочками существенно зависят от радиационных характеристик ограничивающих оболочек. Вариантом оптимизации сопротивления теплопередаче оболочек пневмоопорных объектов является наличие в оболочках замкнутых радиационно-конвективных воздушных контуров, в которых при вертикальном потоке теплоты схемы циркуляции воздуха имеют вид различных форм и ячеек при возникновении свободной конвекции. У изотермических поверхностей движение воздуха происходит при наличии цилиндрических ячеек в зависимости от геометрических характеристик вертикальных поверхностей и числах Рэлея до 1700. Анализ конвективных потоков показывает, что увеличение их характерных размеров приводит к росту числа Ra , являющегося определяющим в расчетах оптимизации тепло- и массопереноса.

В зависимости от термодинамических характеристик пневмоопорных объектов и их ориентации в пространстве процессы теплопереноса зависят от аэродинамики воздушных потоков в различных точках пространства объектов и в пограничном слое. Анализ патентных, экспериментально-промышленных исследований показал, что до настоящего времени отсутствуют оптимальные решения задач тепло- и массозащиты оболочек, микроклимата объектов пневмоопорных конструкций.

Значительную долю численных исследований конвекции составляют расчеты в рамках двумерной геометрии, поскольку в широкой области

пространства параметров конвекция имеет квазидвумерный валиковый характер. В этом направлении вероятно решение многих вопросов, и двумерные численные эксперименты актуальны и в настоящее время. При исследовании динамики трехмерной конвекции посредством численного эксперимента трудоемкость двумерной модели, черты пространственно-временной динамики трехмерной конвекции позволяют (в пределах ограничений самих моделей) составить представление об эволюции сложных конвективных полей, пользуясь сравнительно экономными средствами. Имеются работы, в которых численное моделирование трехмерной конвекции выполнено с использованием двумерных модельных уравнений, а не исходных уравнений гидродинамики [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) - g; \\ \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right); \end{cases} \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \rho = 0; \quad (2)$$

уравнение Клапейрона – Менделеева

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT; \quad (3)$$

уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{c(t)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где τ – время, с; x, y, z – декартовы координаты (ось y направлена вертикально); w_x, w_y, w_z – проекции скорости воздуха на координатные оси x, y, z соответственно, м/с; p – давление воздуха, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; g – гравитационное ускорение, м/с²; t – температура, °С; μ – молярная масса воздуха; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Начальные и граничные условия. Расчет конвективных потоков выполняли при следующих начальных термодинамических параметрах воздуха в объекте:

$$t(\tau = 0) = 18 \text{ }^\circ\text{C}; w_x(\tau = 0) = 0; w_y(\tau = 0) = 0; w_z(\tau = 0) = 3 \text{ м/с}; \\ \rho(\tau = 0) = 1,2 \text{ кг/м}^3$$

и граничных условиях:

$$t_{\Omega_1} = 10 \text{ }^\circ\text{C}; w_{x\Omega_1} = 0; w_{y\Omega_1} = 0; w_{z\Omega_1} = 3 \text{ м/с}; \rho_{\Omega_1} = 1,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$t_{\Omega_2} = 13 \text{ }^\circ\text{C}; w_{x\Omega_2} = w_x; w_{y\Omega_2} = w_y; w_{z\Omega_2} = w_z; \rho_{\Omega_2} = 1,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$t_{\Omega_3} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; w_{x\Omega_3} = 0; w_{y\Omega_3} = 0; w_{z\Omega_3} = 3 \text{ м/с (5 м/с, 2-й расчет)}; \\ \rho_{\Omega_3} = 1,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$t_{\Omega_4} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; w_{x\Omega_4} = 0; w_{y\Omega_4} = 0; w_{z\Omega_4} = 3 \text{ м/с (5 м/с, 2-й расчет)}; \\ \rho_{\Omega_4} = 1,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$t_{\Omega_i} = 18 \text{ }^\circ\text{C}; w_{x\Omega_i} = 0; w_{y\Omega_i} = 0; w_{z\Omega_i} = 0; \rho_{\Omega_4} = \rho,$$

где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ – области сечений оболочки, через которые вероятны тепломассопотоки (зима-лето); Ω_i – внутренняя поверхность оболочки (рис. 2б).

Теплоотдача в тепловом пограничном слое у внутренней поверхности оболочки описывается формулой

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{c\rho} \frac{T - T_{\Omega_i}}{\partial x}, \quad (5)$$

где $\alpha = 60 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ – коэффициент теплоотдачи.

Теплофизические характеристики воздуха: массовая удельная изобарная теплоемкость $c = 1006 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Моделирование конвективных процессов. Многие численные исследования конвекции представлены в рамках двумерной конвекции, так как в широкой области пространства параметров конвекция имеет квазидвумерный валиковый характер [7, 8, 10, 15]. Ранее выполнены расчеты трехмерной конвекции с использованием двумерных модельных уровней и исходных уравнений аэродинамики для протяженных горизонтальных поверхностей с различными аспектными отношениями (отношение горизонтального размера объекта к его высоте) [3, 15].

Моделирование выполняли в соответствии с разработанным специальным программным модулем для расчета пространственного распределения скоростей, температур, давлений в пневмоопорных объектах на основании метода конечных разностей [4].

Поля w, p, t рассчитаны для характерных моментов времени в нестационарном режиме. Рассчитанные поля скоростей, давлений, температур для момента времени 20, 100, 200, 400 с в характерных сечениях объекта при скорости поступления воздуха 3 м/с представлены на рис. 2–5. Температурное поле пневмоопорного объекта при скорости воздуха 3 м/с показано на рис. 6.

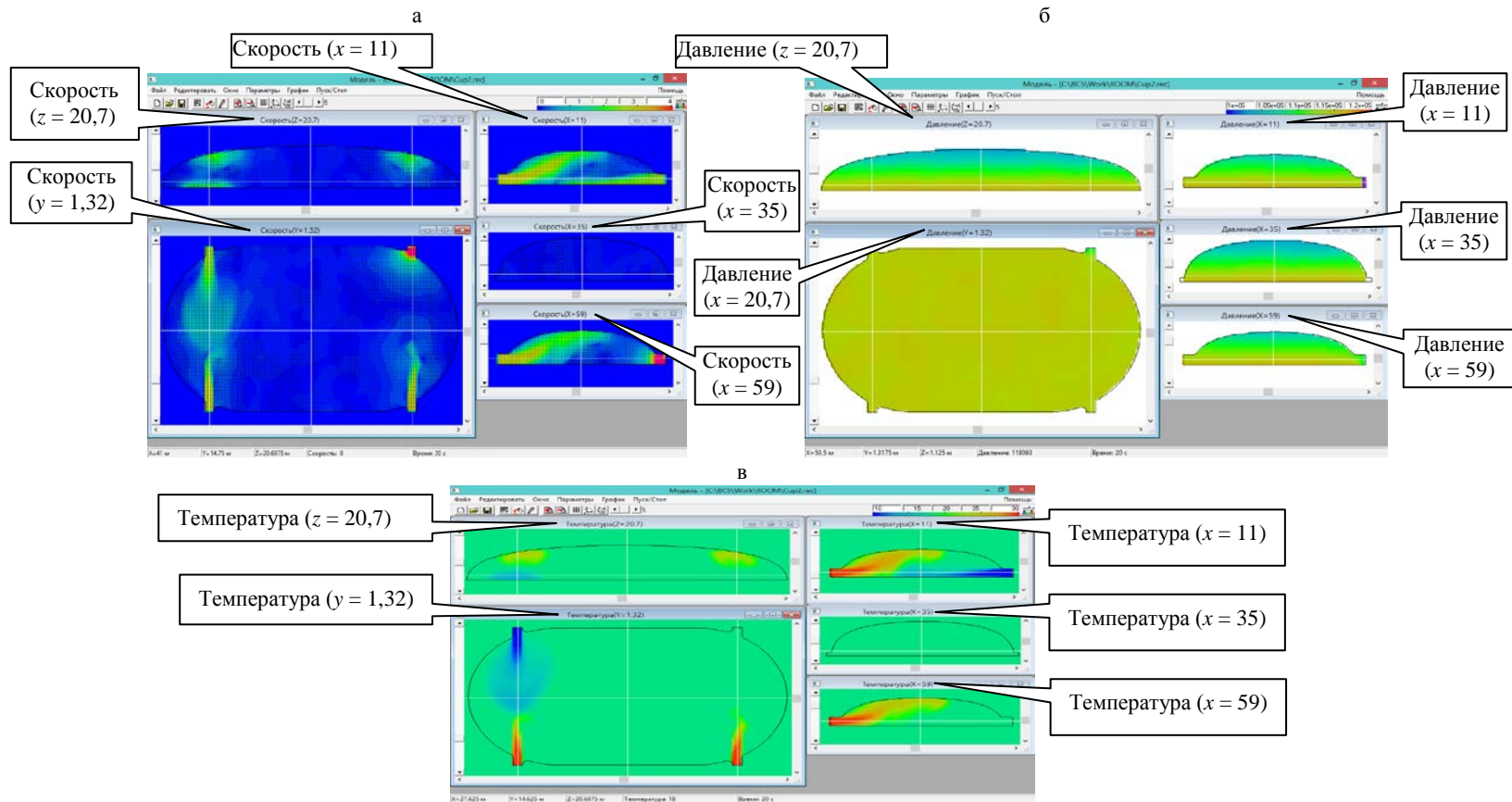


Рис. 2. Расчетные параметры в момент времени 20 с при скорости поступления воздуха 3 м/с:
 а, б, в – распределение скоростей, давления и температур в заданных сечениях соответственно

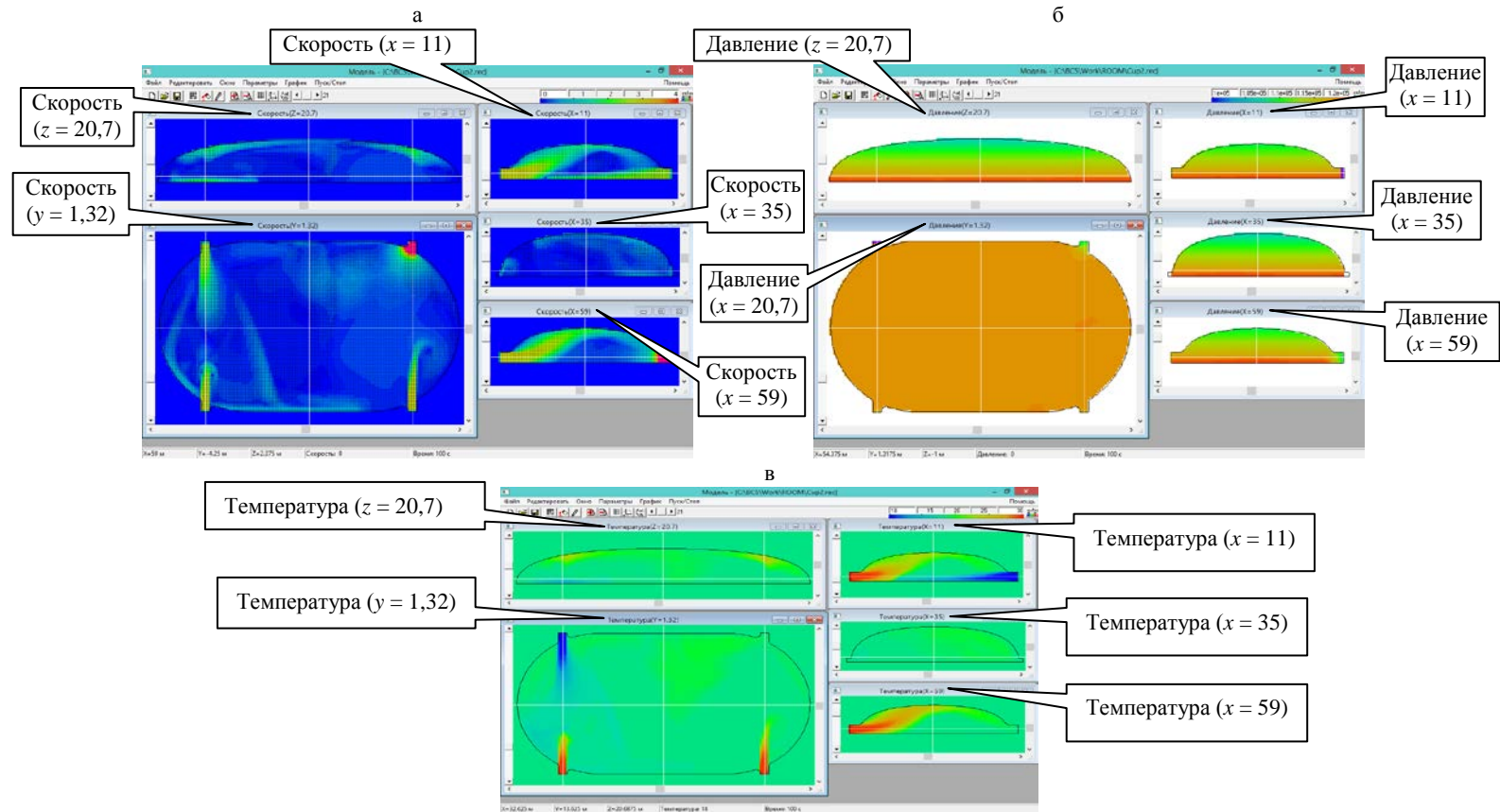


Рис. 3. Расчетные параметры в момент времени 100 с при скорости поступления воздуха 3 м/с:
 а, б, в – распределение скоростей, давления и температур в заданных сечениях соответственно

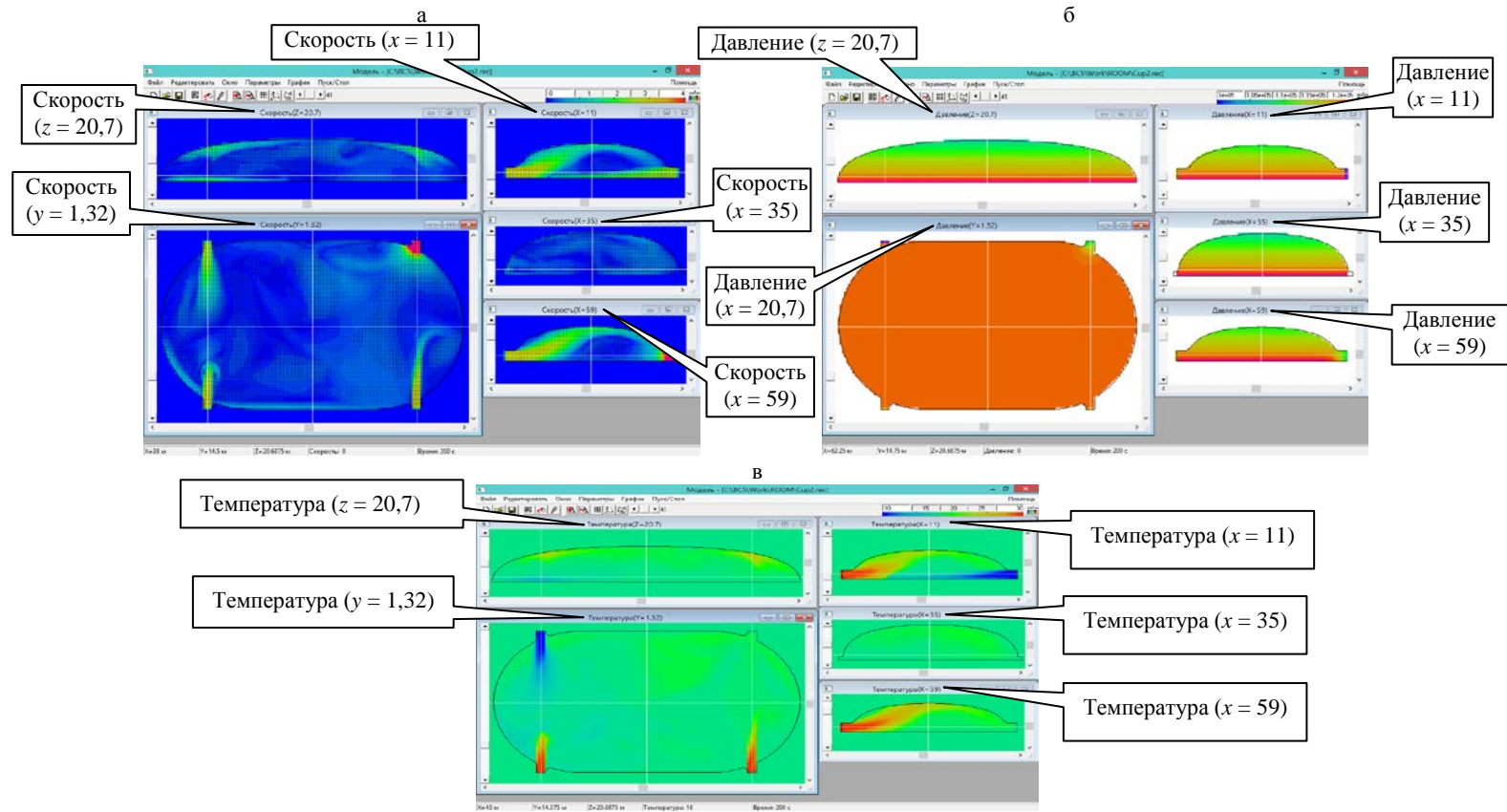


Рис. 4. Расчетные параметры в момент времени 200 с при скорости поступления воздуха 3 м/с:
 а, б, в – распределение скоростей, давления и температур в заданных сечениях соответственно

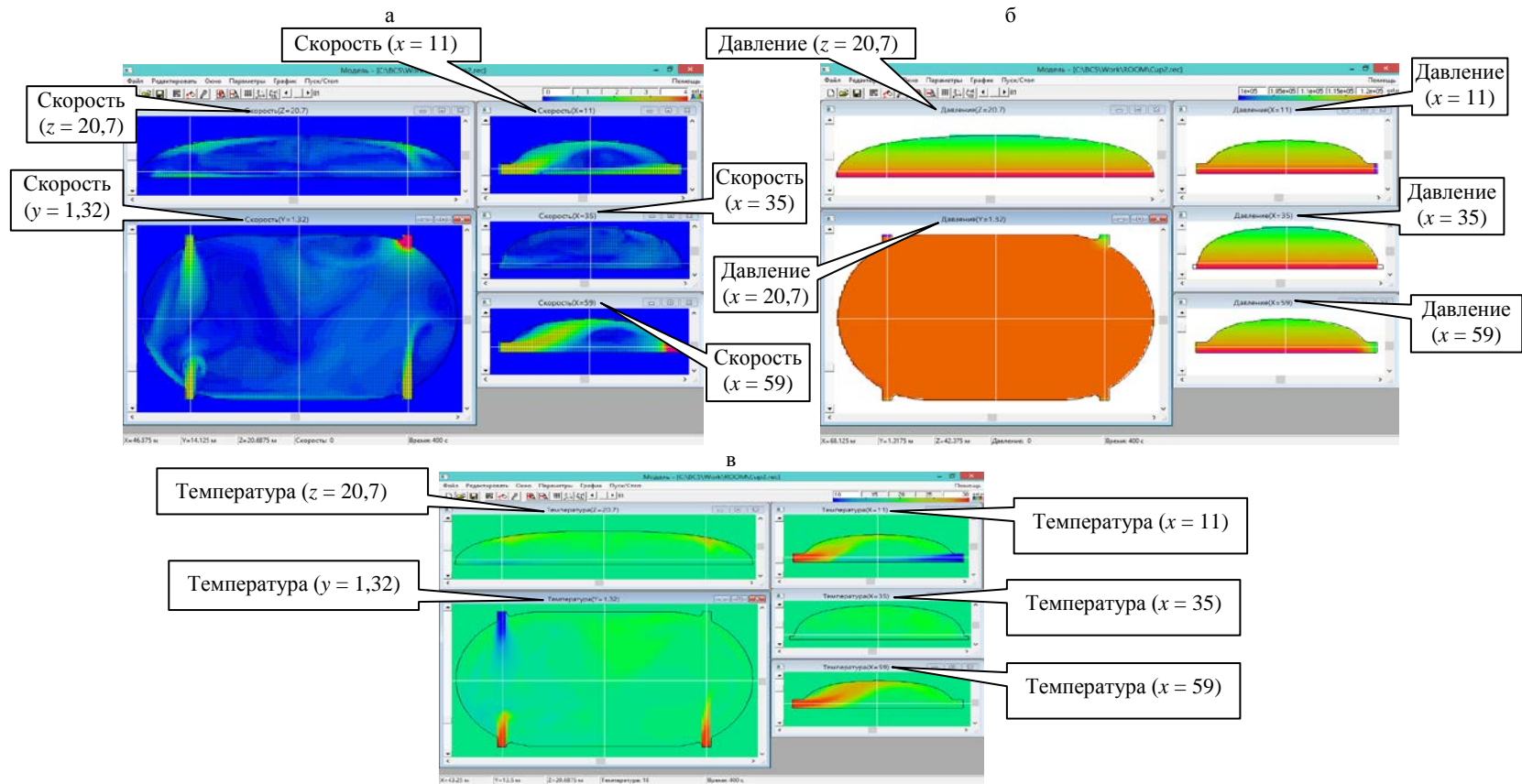


Рис. 5. Расчетные параметры в момент времени 400 с при скорости поступления воздуха 3 м/с:
 а, б, в – распределение скоростей, давления и температур в заданных сечениях соответственно

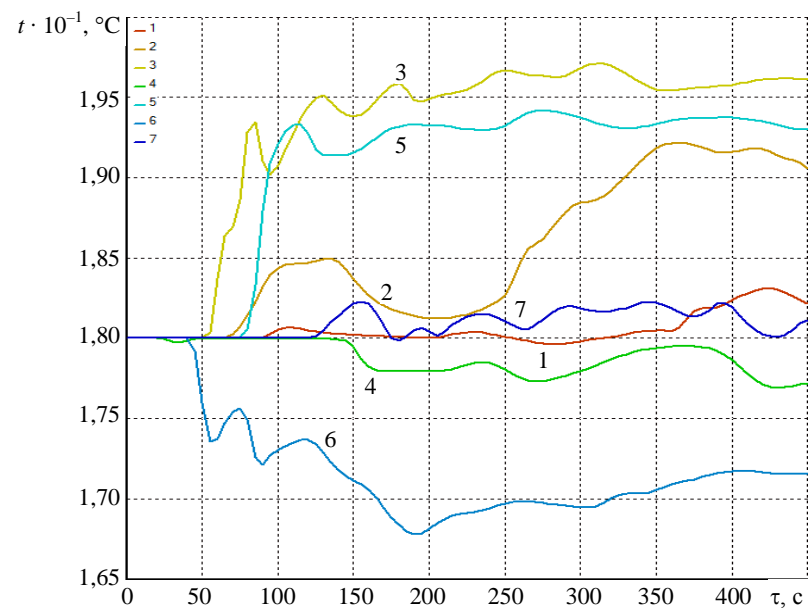
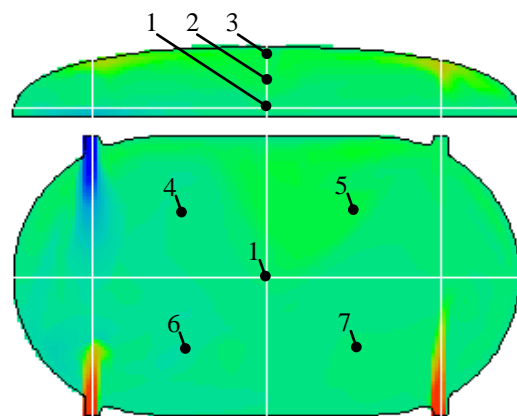


Рис. 6. Температурное поле пневмоопорного объекта при скорости воздуха 3 м/с

Анализ рисунков показывает, что через 20 с температура в области источников теплоты равна 30 °С, скорости изменяются от 1 до 3 м/с. В области притока менее нагретого воздуха имеют место потоки воздуха со скоростями 1–3 м/с (температура 10 °С). Потоки более нагретого воздуха взаимодействуют с внутренними поверхностями оболочки, а менее нагретого – с горизонтально расположенными поверхностями и элементами пневмоопорного объекта для момента времени 100 с в характерных элементах объекта.

Давление внутри объекта увеличивается примерно на 4 кПа. Воздух с высокими температурами имеет более равномерное поле у внутренней поверхности оболочки, в центральной части пневмоопорного объекта температура повышается до 19–20 °С. Давление в пневмоопорном объекте увеличивается примерно на 0,8 кПа. Линии скоростных потоков характеризуются линейными зависимостями, температурные поля – квазистационарные.

ВЫВОДЫ

Разработана и представлена математическая модель процесса конвекции на основе законов сохранения импульса, неразрывности, теплопроводности и граничных условий для пневмоопорных объектов, позволяющая проводить расчеты тепловых и конвективных потоков в трехмерном случае при заданной мощности вентиляторов.

Выполнены расчеты пространственного распределения температур, скоростей, давлений в различные моменты времени для двух вариантов подачи воздуха вентиляторами заданной мощности. Выделены области в пневмоопорных объектах, в которых температуры и скорости воздуха изменяются незначительно, что является следствием малых скоростей воздухопотоков. Вариант подачи воздуха со скоростью 5 м/с через приточное отверстие способствует стабилизации температур в объекте за меньший интервал.

Аспект теоретических исследований – многофакторный, включающий расчет конвективных, радиационных потоков в пневмоопорных объектах при выборе оптимальных технических решений по конфигурациям и размерам вентиляционных отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин, В. Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 41–47.
2. Пилипенко, В. М. Моделирование теплового режима помещений жилых зданий / В. М. Пилипенко // Строительство и архитектура. – 2008. – № 12 – С. 58–63.
3. Воронова, Н. П. Математическое моделирование и управление технологиями промышленных производств / Н. П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
4. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1 – 606 с.
5. Ландау, Л. Д. Гидродинамика: учеб. пособие для студентов физич. специальностей вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд. – М.: Наука, 1986. – 136 с.
6. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: учеб. пособие для ун-тов и вузов / Л. Г. Лойцянский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
7. Пухначев, В. В. Модель конвективного движения при пониженной гравитации / В. В. Пухначев // Моделирование в механике: сб. науч. тр. / Ин-т теоретич. и прикл. механики; редкол.: В. М. Фомин (отв. ред.) [и др.]. – Новосибирск, 1992. – Т. 6, № 4. – С. 47–56.

8. Самарский, А. А. Численные методы решения задач конвекции-диффузии / А. А. Самарский, П. Н. Вабишев. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 247 с.
9. С в о б о д н о к о н в е к т и в н ы е т е ч е н и я , т е п л о - и м а с с о о б м е н : в 2 к н . / Б . Г е б х а р т [и др.]; пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Мир, 1991. – Кн. 1. – 678 с.
10. С о в р е м е н н ы е м а т е м а т и ч е с к и е м о д е л и к о н в е к ц и и / В . К . А н д р е е в [и др.]. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
11. П н е в м а т и ч е с к и е с т р о и т е л ь н ы е к о н с т р у к ц и и / В . В . Е р м о л о в а [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 439 с.
12. П н е в м а т и ч е с к и е к о н с т р у к ц и и в о з д у х о о п о р н о г о т и п а / В . В . Е р м о л о в [и др.], под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1973. – 288 с.
13. Ч е с н о к о в , А . В . Р а б о т а п н е в м а т и ч е с к и х о б о л о ч е к в п о к р ы т и я х з д а н и й / А . В . Ч е с н о к о в // В е с т н и к В о л г о г р а д . г о с . а р х и т . - с т р о и т . у н - т а . С е р . С т р . и а р х и т . – 2012. – Вып. 28 (47). – С. 88–94.
14. Г е т л и н г , А . В . К о н в е к ц и я Р э л е я – Б е н а р а : с т р у к т у р а и д и н а м и к а / А . В . Г е т л и н г . – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
15. Е р м о л о в , В . В . В о з д у х о о п о р н ы е з д а н и я и с о о р у ж е н и я / В . В . Е р м о л о в . – М.: Стройиздат, 1980. – 304 с.

REFERENCES

1. G a g a r i n , V . G . (2008) Economic Analysis of Improving the Level of Thermal Protection of Building Construction Walls. *Stroitel'nye Materialy* [Building materials], 8, 41–47 (in Russian).
2. P i l i p e n k o , V . M . (2008) Heat Regime Simulation in the Premises of Residential Buildings. *Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Building and Architecture], 12, 58–63 (in Russian).
3. V o r o n o v a , N . P . (2009) *Mathematical Modeling and Management of Technology of Industrial Enterprises*. Minsk: BNTU. 260 p. (in Russian).
4. K h r u s t a l e v , B . M . , N e s e n c h u k , A . P . , A k e l ' e v , V . D . , & S e d n i n , V . A . (2007) *Heat and Mass Exchange*: in 2 parts. Minsk: BNTU, Part 1. 606 p. (in Russian).
5. L a n d a u , L . D . , & L i f s h i t s , E . M . (1986) *Hydrodynamics*. 3rd Edition. Moscow, Nauka. 136 p. (in Russian).
6. L o i t s y a n s k i i , L . G . (1970) *Fluid and gas Mechanics*. 3rd Edition. Moscow, Nauka. 904 p. (in Russian).
7. P u k h n a c h e v , V . V . (1992) Convectional Movement Model with Low Gravitation. *Modelirovanie v Mekhanike. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Modelling in Mechanics. Scientific Works book], 6 (4), 47–56 (in Russian).
8. S a m a r s k i i , A . A . , & V a b i s h e v , P . N . (1999) *Numerical Methods Tasks Decision of Convectional Diffusion*. Moscow, Editorial URSS. 247 p. (in Russian).
9. G e b h a r d t , B . , D z h a l u r i a , I . , M a k h a d z h a n , R . , & S a m m a k i i a , B . (1991) *Streams with Free Convection, Heat and Mass Exchange*. In 2 Books. Moscow, Mir, Book 1. 678 p. (in Russian).
10. A n d r e e v , V . K . , G a p o n e n k o , I u . A . , G o n c h a r o v a , O . N . , & P u k h n a c h e v , V . V . (2008) *Modern Mathematical Convection Models*. Moscow, Fizmatlit. 368 p. (in Russian).
11. E r m o l o v , V . V . , B a i r d , W . H . , & B u b n e r , A . (1983) *Pneumatic Building Constructions*. Moscow, Stroyizdat. 439 p. (in Russian).
12. E r m o l o v , V . V . , V o b l y i , A . S . , & M a n ' s h a v i n , A . I . (1973) *Pneumaticheskie Konstruktsii Vozduhoopornogo Tipa*. Moscow, Stroyizdat. 288 p. (in Russian).
13. C h e s n o k o v , A . V . (2012) Pneumatical Volume Action in Building Cover. *Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Vestnik of Volgograd State Architectural-Building University. Middle part: Building and architecture], 28 (47), 88–94 (in Russian).
14. G a t l i n g , A . V . (1999) *Rayleigh-Benard Convection: Structure and Dynamics*. Moscow, Editorial URSS. – 248 p. (in Russian).
15. E r m o l o v , V . V . (1980) *Airholding Buildings and Constructions*. Moscow, Stroyizdat. 304 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
теплогасоснабжения и вентиляции

Поступила 07.07.2014