

УДК 697.112.3:620.179.11

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ПНЕВМООПОРНЫХ ОБЪЕКТАХ*

Часть 2

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

Белорусский национальный технический университет

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

В статье рассмотрены моделирование и исследование аэродинамических процессов на участках пространства (включающих группу строительных сооружений сложной конфигурации для различных режимов капельных и воздушных потоков и температурных условий) и в строительных сооружениях сложной конфигурации (для различных режимов отопления и вентиляции). Разработаны специализированные программы для решения инновационных задач в области тепло- и массообмена в трехмерном пространстве давлений – скоростей – температур объекта.

Область применения пневмоопорных объектов – строительство и покрытие теннисных кортов, хоккейных площадок, бассейнов, а также выставки, цирки, кафе, аквапарки, киностудии, мобильные объекты медицинского назначения, ангары, гаражи, строительные площадки, станции техобслуживания и т. д. Достоинствами таких объектов являются возможность и простота многократного монтажа и демонтажа. Их широкое внедрение определяется температурно-влажностными условиями под оболочкой.

Аналитико-расчетные исследования, натурные обследования тепло- и массообменных термодинамических параметров, многофакторных процессов воздушной среды в пневмоопорных объектах, их оболочках, в широком диапазоне климатических параметров воздуха (январь – декабрь) в Республике Беларусь, в различных географических широтах многих стран показали, что предел возможности оптимизации от ветровых нагрузок, потоков теплоты, акустических воздействий бесконечен (спортивные, жилые, промышленные, складские, военные технические единицы (танки, самолеты и т. д.)). В продолжение к моделированию конвективных потоков в пневмоопорных объектах (часть 1) представлены процессы с более высокими динамическими параметрами воздушных потоков для характерных размеров пневмоопорных объектов, проведен расчет полей скоростей, температур, давлений с увеличенной до 5 м/с скоростью поступления воздуха через приточные отверстия в различные моменты времени (20, 100, 200, 400 с). Расчет осуществлялся с использованием разработанной математической модели процессов конвекции, тепло- и массообмена в неограниченном пространстве на основе законов сохранения импульса, неразрывности, теплопроводности и граничных условий для пневмоопорных объектов, позволяющих анализировать и рассчитывать тепловые и конвективные потоки в трехмерном пространстве (часть 1).

Ключевые слова: пневмоопорные объекты, конвективные потоки, теплота, оболочки, скорость, температура воздуха, давление, тепло- и массоперенос.

Ил. 6. Библиогр.: 12 назв.

* Начало статьи (часть 1) этих же авторов см. в № 4/2014 г.

MODELING OF CONVECTIVE STREAMS IN PNEUMOBASIC OBJECTS

Part 2

**KHROUSTALEV B. M., AKELYEV V. D.,
MATYUSHINETS T. V., KOSTEVICH M. F.**

Belarusian National Technical University

The article presents modeling for investigation of aerodynamic processes on area sections (including a group of complex constructional works for different regimes of drop and wind streams and temperature conditions) and in complex constructional works (for different regimes of heating and ventilation). There were developed different programs for innovation problems solution in the field of heat and mass exchange in three-dimensional space of pressures-speeds-temperatures of objects.

The field of uses of pneumobasic objects: construction and roof of tennis courts, hockey pitches, swimming pools, and also exhibitions' buildings, circus buildings, cafes, aqua parks, studios, mobile objects of medical purposes, hangars, garages, construction sites, service stations and etc. Advantages of such objects are the possibility and simplicity of multiple installation and demolition works. Their large-scale implementation is determined by temperature-moisture conditions under the shells.

Analytical and calculating researches, real researches of thermodynamic parameters of heat and mass exchange, multifactorial processes of air in pneumobasic objects, their shells in a wide range of climatic parameters of air (January – December) in the Republic of Belarus, in many geographical latitudes of many countries have shown that the limit of the possibility of optimizing wind loads, heat flow, acoustic effects is infinite (sports, residential, industrial, warehouse, the military-technical units (tanks, airplanes, etc.)). In modeling of convective flows in pneumobasic objects (part 1) there are processes with higher dynamic parameters of the air flow for the characteristic pneumobasic object, carried out the calculation of the velocity field, temperature, pressure at the speed of access of air through the inflow holes up to 5 m/sec at the moments of times (20, 100, 200, 400 sec). The calculation was performed using the developed mathematical model of convection processes, heat and mass exchange in unlimited space based on the laws of momentum conservation, continuity, thermal conductivity and the boundary conditions for pneumobasic objects which allow analyze, calculate thermal, convection streams in three-dimensional space (part 1).

Keywords: pneumobasic objects, convective streams, heat, shells, speed, air temperature, pressure, heat and mass exchange.

Fig. 6. Ref.: 12 titles.

Для моделирования конвективных потоков в пневмоопорных объектах рассмотрен случай с более высокими физическими параметрами воздушных потоков, для которых выполнен расчет полей скоростей, температур и давлений с увеличенной до 5 м/с скоростью поступления воздуха через приточное отверстие. В отличие от работ, основывающихся на двумерных численных экспериментах [1–6], авторы выполняли исследования с использованием математической модели процессов конвекции, уровней сохранения импульса, неразрывности, теплопроводности и граничных условий 3-го рода в пневмоопорных объектах, позволяющей реализовать расчеты тепловых и конвективных потоков в трехмерном пространстве. Моделирование конвективных потоков было рассмотрено в части 1 статьи [7].

Поля скоростей, температур и давлений анализировали при следующих начальных термодинамических параметрах воздуха:

$$t(\tau = 0) = 18 \text{ }^\circ\text{C}; w_x(\tau = 0) = 0 \text{ м/с}; w_y(\tau = 0) = 0 \text{ м/с};$$

$$w_z(\tau = 0) = 3 \text{ м/с}; \rho(\tau = 0) = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

В качестве граничных условий приняты:

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

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

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

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

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

где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ – области приточных участков для воздухопотоков; Ω_i – внутренняя поверхность оболочки (рис. 1).

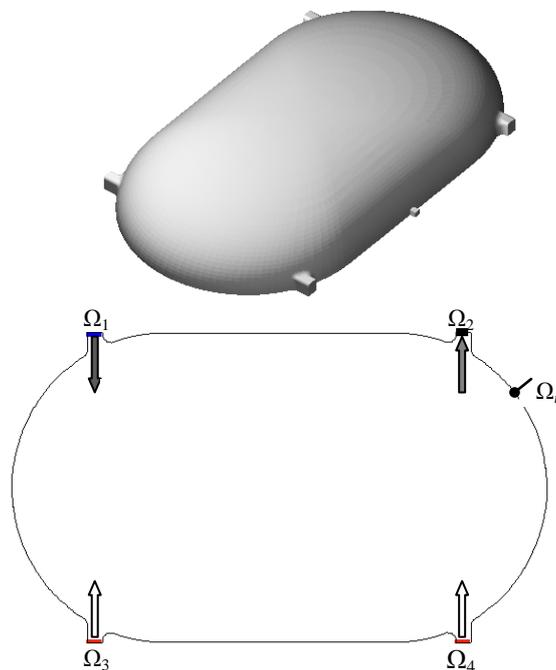


Рис. 1. Модель пневмоопорного объекта

Использовали следующие теплофизические характеристики воздушной среды [3, 8–12]: массовую, удельную изобарную теплоемкость $c = 1006 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; плотность $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Моделирование процессов теплообмена в пневмоопорных объектах реализовано при помощи специального программного модуля для расчета полей скоростей, температур и давлений воздуха в различные интервалы времени. Поля термодинамических характеристик воздуха w, p, t , рассчитанные для интервалов времени, соответствующих этапам в первой части исследования (20, 400 с), в характерных сечениях пневмоопорных объектов при скорости приточного воздушного потока 5 м/с представлены на рис. 2–5.

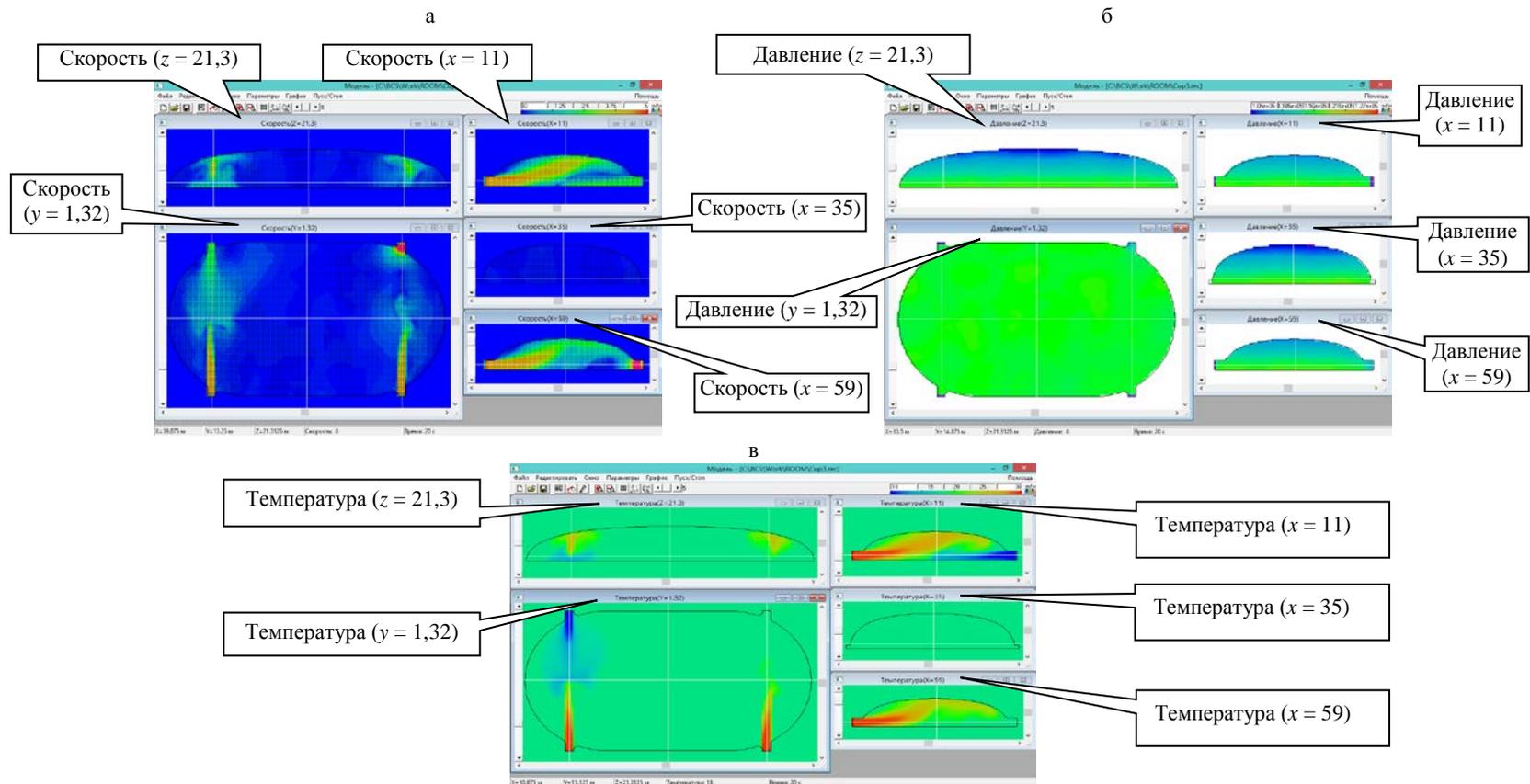


Рис. 2. Распределение расчетных параметров в момент времени 20 с в характерных сечениях при скорости поступления воздуха 5 м/с в полях:
а – скоростей; б – давлений; в – температур

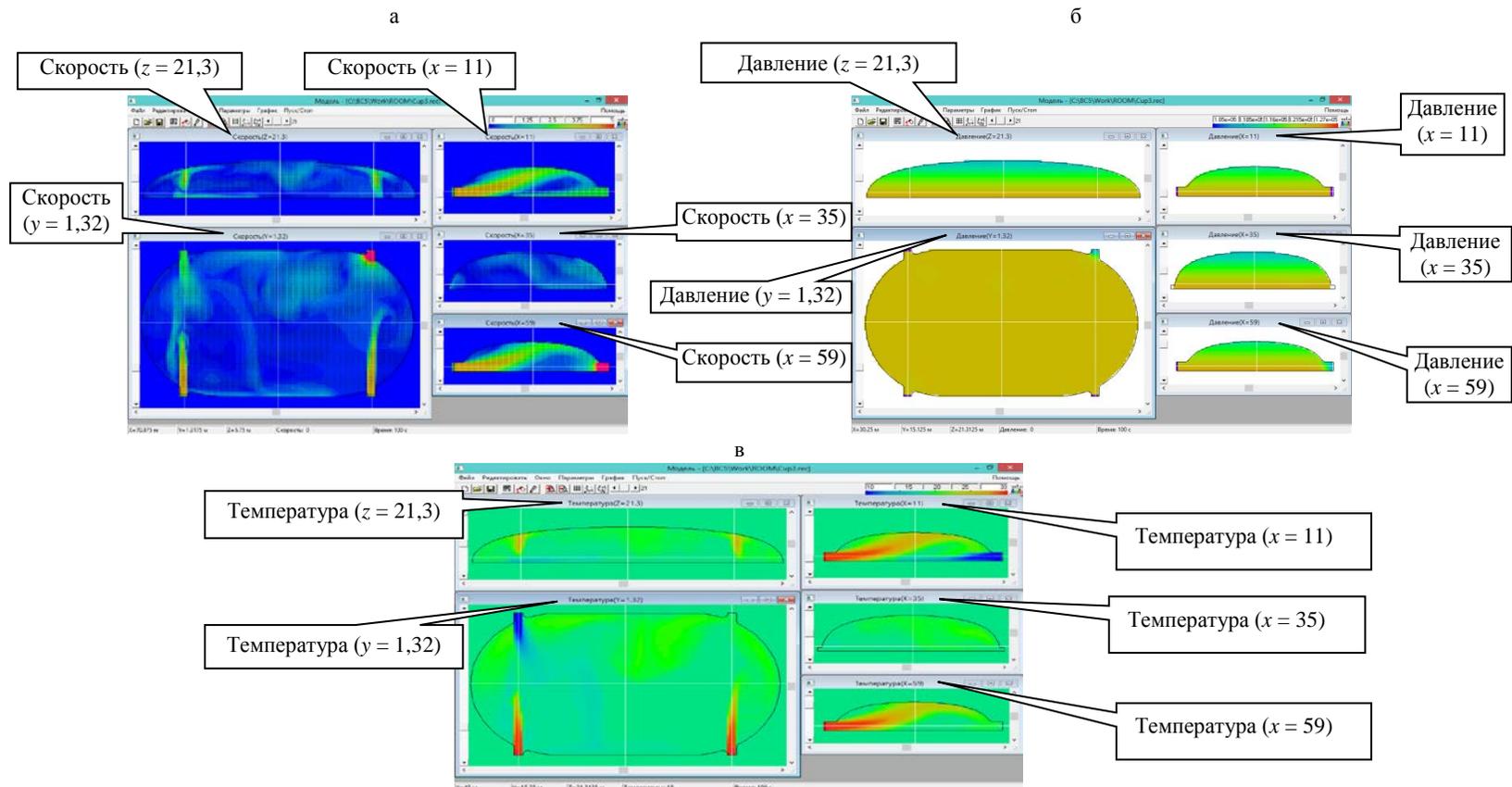


Рис. 3. Распределение расчетных параметров в момент времени 100 с при скорости поступления воздуха 5 м/с в полях:
а – скоростей; б – давлений; в – температур

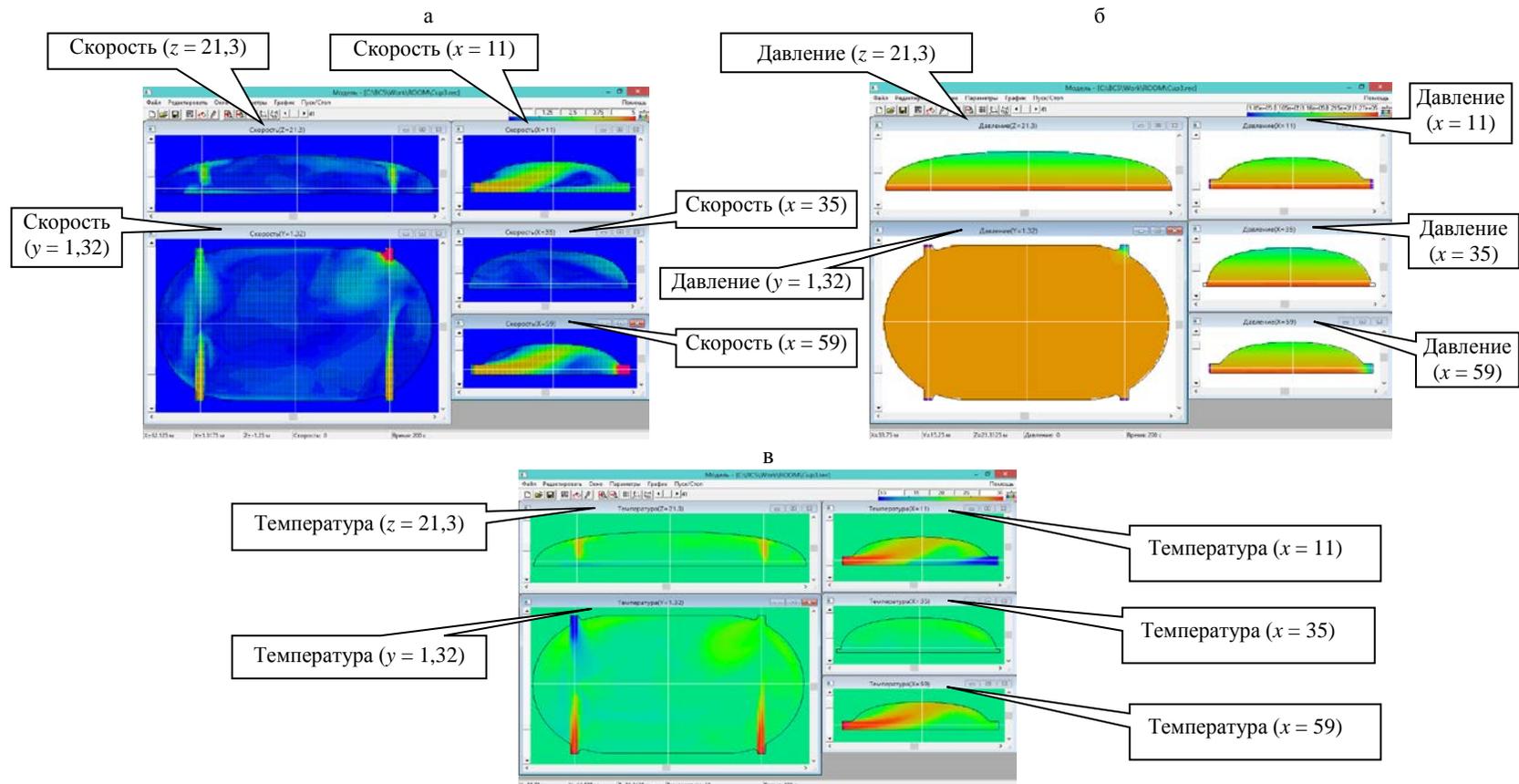


Рис. 4. Распределение расчетных параметров в момент времени 200 с в характерных сечениях при скорости поступления воздуха 5 м/с в полях:
 а – скоростей; б – давлений; в – температур

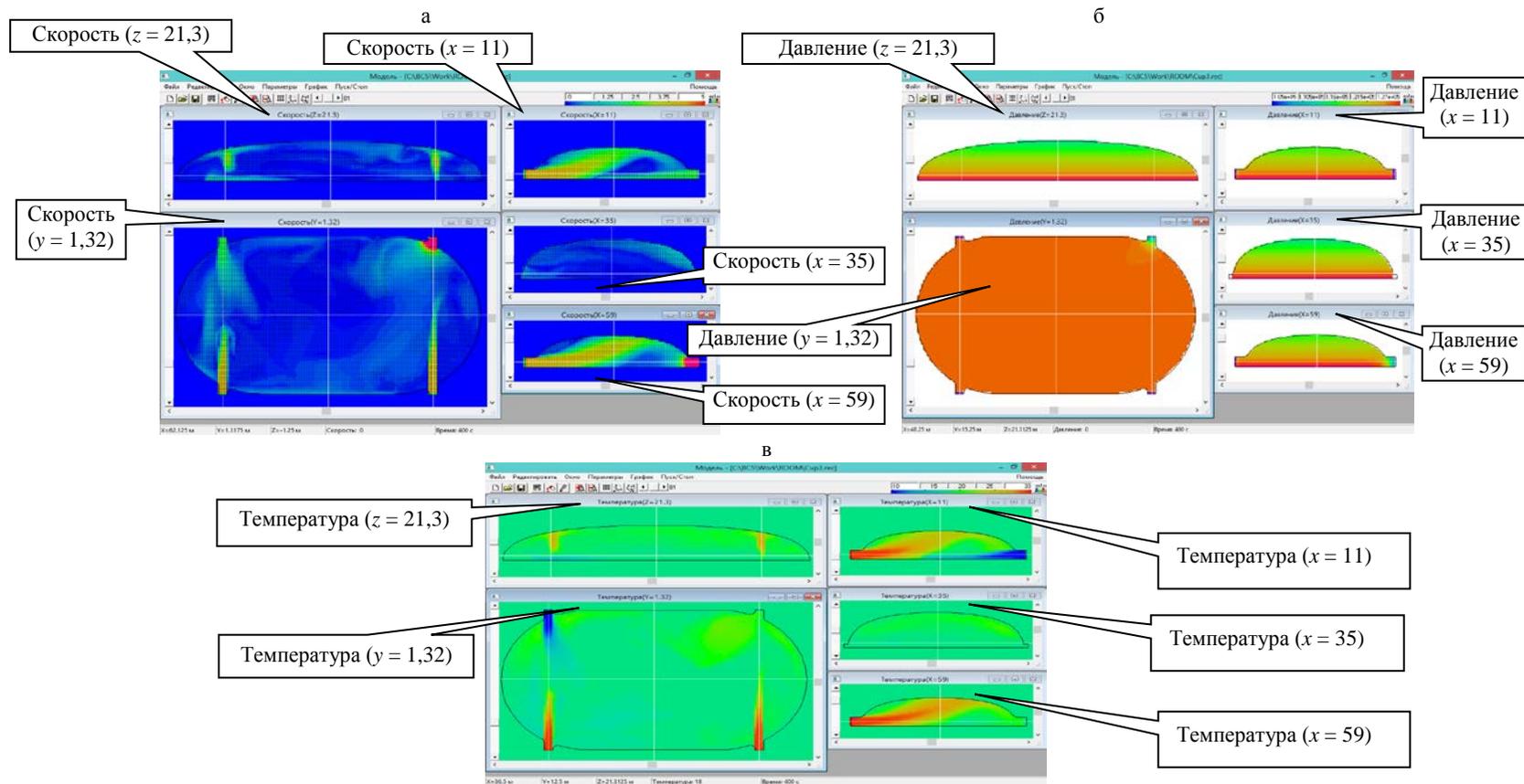


Рис. 5. Распределение расчетных параметров в момент времени 400 с в характерных сечениях при скорости поступления воздуха 5 м/с в полях:
 а – скоростей; б – давлений; в – температур

Анализ данных, полученных по результатам математического моделирования процессов конвекции пневмоопорного объекта, показывает, что на начальный момент времени поле температур в области источников нагрева имеет значение порядка $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время скорость воздуха изменяется в интервале от 1 до 5 м/с. В области поступления холодного воздуха наблюдается поток со скоростью 1–3 м/с и температурой $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере поступления теплого воздуха он начинает стелиться по потолку, однако интенсивность данного процесса ниже, чем в первом расчетном случае, со скоростью воздушного потока 3 м/с, одновременно с этим поток холодного воздуха растекается по плоскости пола. На следующем моменте времени (расчетное время составляет 100 с) отмечается слабоинтенсивный прирост значения давления внутри пневмоопорной конструкции (примерно на 7 кПа). При этом распределение теплого воздуха в верхней части объекта имеет неравномерный характер. В центральной части пневмоопорного объекта отмечается образование области повышенной температуры воздуха ($20\text{--}21\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Момент времени 200 с отмечается некоторым приростом давления внутри конструкции (примерно на 2 кПа). Конфигурация скоростных потоков изменяется сложным образом. Теплый воздух более равномерно распределяется вдоль потолка. Образовавшаяся на предыдущем этапе область повышенной температуры под действием поступающего теплого воздуха из центральной части смещается к выходному проему.

К расчетному моменту времени 400 с наступает стабилизация значения давления внутри пневмоопорного объекта. По сравнению с предыдущим моментом времени 200 с, происходит незначительное изменение конфигурации скоростных потоков воздуха внутри пневмоопорного объекта. На данном этапе температурное поле внутри объекта уже практически не меняется. То есть на момент времени 400 с система пришла в состояние динамического равновесия.

Графики изменения температуры в выделенных точках пространства пневмоопорной конструкции приведены на рис. 6. Из графиков видно, что температура воздуха внутри объекта распределена также достаточно неравномерно ($16\text{--}21\text{ }^{\circ}\text{C}$) как по высоте, так и в горизонтальном сечении.

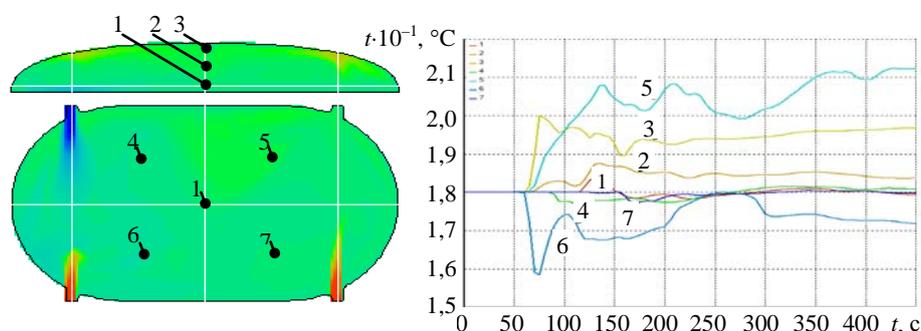


Рис. 6. Графические зависимости температур в различных точках пространства пневмоопорного объекта при скорости поступления воздуха 5 м/с

На входе в пневмоопорный объект скорость воздуха принимали 5 м/с, температура по вертикали (осевая область, точка 1) в интервалах времени от 120 до 400 с изменялась от 18,3 до 10,0 °С (рис. 6). Результаты натурно-экспериментальных обследований при тех же начальных граничных условиях аналогичны. Максимальные температуры (20; 19; 5 °С) имеют место через 70 и 400 с у внутренней поверхности оболочки (точка 3). Численные значения температур, полученные из результатов их компьютерного моделирования, показали, что в пневмоопорном объекте они функционально связаны с продолжительностью и скоростью поступления воздушных потоков, их геометрическими размерами.

ВЫВОДЫ

1. В момент времени 20 с поля температуры в области нагревателей равны ≈ 30 °С; скорости воздуха изменяются от 1 до 5 м/с; в области менее нагретого воздуха скорости равны 1–3 м/с. При температуре 10 °С потоки теплого воздуха перемещаются к внутренней поверхности оболочек с меньшей интенсивностью по сравнению с результатами исследований, представленными в первой части статьи [7], а холодного – к поверхности.

2. Для интервала времени 100 с характерно увеличение давления воздуха в пневмоопорном объекте примерно на 7 кПа. Более нагретый воздух неравномерно распределяется у внутренних поверхностей оболочек; в их центральной части температура увеличивается до 20–21 °С. В момент времени 200 с давление в объекте повышается примерно на 2 кПа. К 400 с отмечается стабилизация давления в пневмоопорном объекте относительно момента времени в 200 с, конфигурация скоростных потоков изменяется незначительно, а температурных – стабильна; к 400 с система стремится к состоянию динамической устойчивости.

3. Профили потоков скоростей зависят от многих факторов, например теплый воздух более равномерно распределяется у поверхности оболочки, область с более высокими температурами из центральных объемов смещается к участкам, где происходит удаление воздуха.

4. Графоаналитические исследования показали, что в объемах пневмоопорных объектов температурные поля воздуха трехмерны (16–21 °С) как в вертикальных, так и в горизонтальных сечениях. Области, в которых температуры и скорости изменяются незначительно, возникают вследствие неэффективного функционирования систем вентиляции. Показано, что скорость потока воздуха 5 м/с через приточные сечения способствует релаксации температур в объекте за меньший интервал времени.

5. Выполнены расчеты пространственного распределения температур, скоростей и давлений воздуха в различные интервалы времени для двух вариантов подачи воздуха с помощью нагнетателей заданной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пухначев, В. В. Модель конвективного движения при пониженной гравитации / В. В. Пухначев // Моделирование в механике: сб. науч. трудов / Ин-т теоретич. и прикл. механики; редкол.: В. М. Фомин (отв. ред.) [и др.]. – 1992. – Т. 6, № 4. – С. 47–56.
2. Самарский, А. А. Численные методы решения задач конвекции–диффузии / А. А. Самарский, П. Н. Вабишев. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 247 с.

3. 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 д [и др.]; пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Мир, 1991. – Кн. 1. – 678 с.
4. А н д р е е в , В . К . О б у с т о й ч и в о с т и р а в н о в е с и я п л о с к о г о с л о я в м о д е л и м и к р о к о н в е к ц и и / В . К . А н д р е е в , В . Б . Б е к е ж а н о в а // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 43–53.
5. Д ж а л у р и я , Й . Е с т е с т в е н н а я к о н в е к ц и я : т е п л о - и м а с с о о б м е н / Й . Д ж а л у р и я ; пер. с англ. С. Л. Вишневецкого; под ред. В. И. Полежаева. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
6. 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.
7. М о д е л и р о в а н и е к о н в е к т и в н ы х п о т о к о в в п н е в м о о п о р н ы х о б ъ е к т а х / Б . М . Х р у с т а л е в [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 4. – С. 42–55.
8. 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.
9. П и л и п е н к о , В . М . М о д е л и р о в а н и е т е п л о в о г о р е ж и м а п о м е щ е н и й ж и л ы х з д а н и й / В . М . П и л и п е н к о // Строительство и архитектура. – 2008. – № 12. – С. 58–63.
10. Т е п л о - и м а с с о о б м е н : у ч е б . п о с о б и е д л я с т у д е н т о в у ч р е ж д е н и й , о б е с п е ч и в а ю щ и х п о л у ч е н и е в ы с ш . о б р а з о в а н и я п о с т р о и т . , э н е р г е т . и м а ш и н о с т р о и т . с п е ц и а л ь н о с т я м : в 2 ч . / Б . М . Х р у с т а л е в [и др.]. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
11. С е б и с и , Т . К о н в е к т и в н ы й т е п л о о б м е н : ф и з и ч е с к и е о с н о в ы и в ы ч и с л и т е л ь н ы е м е т о д ы / Т . С е б и с и , П . Б р э д ш о у ; пер. с англ. С. С. Ченцова, В. А. Хохрякова; под ред. У. Г. Пирумова. – М.: Мир, 1987. – 590 с.
12. С п о л д и н г , Д . Б . К о н в е к т и в н ы й м а с с о п е р е н о с / Д . Б . С п о л д и н г ; пер. с англ. З. П. Шульмана; под ред. А. В. Лыкова. – Л.; М.: Энергия, 1965. – 384 с.

REFERENCES

1. P u h n a c h e v , V . V . (1992) Model of Convective Motion in Low Gravity. *Modelirovanie v Mekhanike: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Modeling in Mechanics. Collection of Scientific Papers], 6 (4), 47–56 (in Russian).
2. S a m a r s k i y , A . A . , & V a b i s h e v , P . N . (1999) *Numerical Methods of the Diffusion–Convection Problems Solution*. Moscow: Editorial of URSS. 247 p. (in Russian).
3. G e b k h a r d , B . , D z h a l u r i 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) *Free-Convection Flows (Streams), Heat and Mass Exchange. Book 1*. Moscow, Mir. 678 p. (in Russian).
4. A n d r e e v , V . K . , & B e k e g a n o v a , V . B . (2002) About Stability of Plane Layer Balance in Micro-Convection Model. *Prikladnaia Mekhanika i Tekhnicheskaiia Fizika* [Applied Mechanics & Engineering Physics], 43 (2), 43–53 (in Russian).
5. D z h a l u r i i a , I . (1983) *Natural Convection: Heat and Mass Exchange*. Moscow, Mir. 399 p. (in Russian).
6. 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) *Current Mathematical Models of Convection*. Moscow, Fizmatlit. 368 p. (in Russian).
7. K h r o u s t a l e v , B . M . , A k e l ' e v , V . D . , M a n i u s h i n e t s , T . V . , & K o s t e v i c h , M . F . (2014) Modeling of Convective Flows in Pneumobasic Objects. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 4, 42–55 (in Russian).
8. E r m o l o v , V . V . (1980) *Air-Supported Buildings and Structures*. Moscow, Stroyizdat. 304 p. (in Russian).
9. P i l i p e n k o , V . M . (2008) Modeling of Heat Balance of Residential Buildings. *Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Engineering & Architecture], 12, 58–63 (in Russian).
10. K h r o u s t a l e v , B . M . , N e s e n c h u k , A . P . , T i m o s h p o l ' s k i i , V . I . , A k e l ' e v , V . D . , S e d n i n , V . A . , K o p k o , V . M . , & N e r e z ' k o , A . V . (2007) *Heat and Mass Exchange. Part 1*. Minsk: Belarusian National Technical University. 606 p. (in Russian).
11. S e b i s i , T . , & B r e d s h o w , P . (1987) *Convective Heat and Mass Exchange: Physical Basis and Calculating Methods*. Moscow, Mir. 590 p. (in Russian).
12. S p o l d i n g , D . B . (1965) *Convective Mass Transfer*. Leningrad; Moscow, Energia. 384 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 18.12.2014