

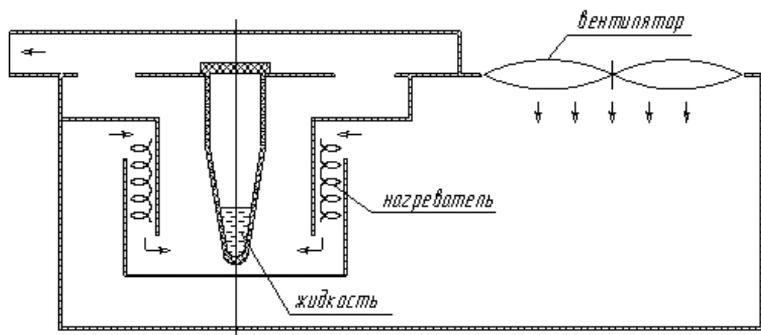
А. А. Крутиков, К. Е. Демихов,  
А. В. Чернышев, О. В. Белова,  
И. А. Смирнов

## **РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

*Приведена математическая модель расчета нестационарных процессов динамики жидкости и теплообмена в пневматической системе стабилизации температуры. Рассмотрен метод расчета, основанный на современных методах автоматизированного проектирования. Приведены результаты численного исследования тепловых переходных процессов в отдельных элементах системы.*

В современной технике широко применяются системы стабилизации температуры, предназначенные для поддержания определенной температуры объекта с заданной точностью. По принципу действия системы подразделяются на пассивные и активные. В пассивных системах постоянство температуры достигается путем ограждения термостатируемого объекта тепловой изоляцией, играющей роль теплового фильтра. Пассивные системы способны поддерживать температуру объекта, равной среднему значению температуры окружающей среды. Пассивные системы не содержат терморегулирующих устройств и не требуют дополнительных затрат энергии, что является одним из главных их достоинств. Однако в случаях, когда допустимое отклонение температуры объекта от заданного значения не должно превышать долей градуса, при возмущающих воздействиях, способных вызвать колебания температуры незащищенного объекта равные нескольким десяткам градусов, необходимо активно противостоять возмущающим тепловым воздействиям. С этой целью широко применяются активные системы стабилизации температуры, работа которых основана на использовании технических средств автоматического регулирования. Заданная температура объекта поддерживается автоматическим регулированием притока (оттока) теплоты, подводимой к объекту. Можно выделить два класса подобных систем: системы автоматической стабилизации, предназначенные для поддержания постоянной температуры объекта в известных пределах, и системы программного регулирования, в которых температура объекта изменяется по определенному закону.

В настоящей статье рассматривается устройство, которое представляет собой систему прецизионного программного регулирования температуры микроколичеств жидких образцов. Температура объекта изменяется при помощи прокачки рабочего тела через тепловой блок



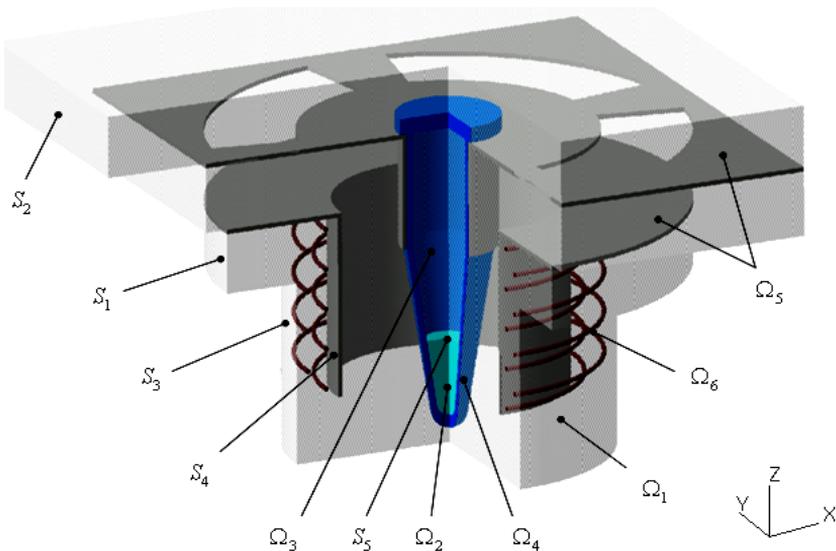
**Рис. 1. Схема пневматической системы термостабилизации**

системы стабилизации температуры (рис. 1). Рабочее тело используется в качестве теплоносителя при подводе (отводе) теплоты. Одной из важнейших характеристик рассматриваемого устройства является неравномерность распределения температур по объему объекта.

Рассматриваемое устройство представляет собой открытую термодинамическую систему, границы которой проницаемы как для потока вещества, так и для теплового взаимодействия, и может рассматриваться как объект с сосредоточенными параметрами или как объект с распределенными параметрами. Математическое описание тепловых процессов в приближении объекта с сосредоточенными параметрами не позволяет получить распределение физических величин по объему системы. Следовательно, невозможно отследить неравномерность теплового поля объекта термостабилизации, что является существенным недостатком этого метода. Для получения температурных полей необходимо рассматривать устройство в приближении объекта с распределенными параметрами. Такое приближение более точно описывает реальные физические процессы, в том числе переходные процессы, протекающие в устройствах.

**Постановка задачи.** Принципиальная схема пневматической системы стабилизации температуры включает в себя следующие основные элементы: источник теплоты, объект теплового воздействия и рабочее тело. В исследуемой системе стабилизации температуры источником теплоты служит электрический нагреватель, а объектом теплового воздействия — жидкость, которая расположена в сосуде объемом 0,2 мл. В качестве рабочего тела в пневматических системах используется воздух окружающей среды.

Вентилятор обеспечивает перемещение воздуха окружающей среды через электрический нагреватель. Далее рабочее тело вступает в тепловой контакт с сосудом, в котором находится жидкость. После этого рабочее тело выбрасывается в окружающую среду. Теплота от объекта воздействия отводится в результате замещения горячего воздуха более холодным из окружающей среды.



**Рис. 2. Расчетная область  $\Omega$ :**

$S_1$  и  $S_2$  — вход и выход из расчетной области;  $S_3$  — внешние границы расчетной области;  $S_4$  и  $S_5$  — границы раздела между жидкой средой и твердым телом, а также воздухом в сосуде

От преобразователя энергии рабочее тело получает теплоту в результате конвективного теплообмена. Через стенку сосуда теплота передается теплопроводностью. В процессе нагрева жидкости возникает неравномерное распределение температур по ее объему, в результате чего возникает разность плотностей и, как следствие, разность гравитационных сил. Следовательно, в объеме жидкости наблюдается свободное движение и теплота от внутренней стенки сосуда к жидкости передается в процессе конвективного теплообмена.

В качестве расчетной области выбрана часть теплового блока пневматической системы стабилизации температуры (рис. 2), которая содержит объект исследования и наиболее полно и точно отражает происходящие в нем тепловые процессы. Как объект исследования в настоящей работе выступает жидкость, находящаяся в сосуде. Для более полного описания процессов теплообмена между рабочим телом и сосудом в расчетную область также включены рабочее тело и электрический нагреватель.

В итоге расчетная область будет состоять из газообразного рабочего тела  $\Omega_1$ , жидкости  $\Omega_2$ , воздуха  $\Omega_3$ , сосуда  $\Omega_4$ , стенок  $\Omega_5$  и электрического нагревателя  $\Omega_6$ .

**Математическая модель.** При построении математической модели приняты следующие допущения: жидкая среда считается ньютоновской и несжимаемой; движение жидкой среды ламинарное; все рассматриваемые материалы однородны по составу и изотропны по теплофизическим свойствам; физические параметры жидкой среды

(исключая плотность жидкости и воздуха в сосуде), а также твердого тела постоянны и не зависят от температуры; плотность жидкости и воздуха в сосуде является линейной функцией температуры; массообмен между жидкостью и воздухом в сосуде отсутствует.

Система уравнений для описания процессов гидродинамики и теплообмена жидкой среды включает в себя [1–4]:

уравнения движения для жидкой среды

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i u) + \operatorname{div} (\rho_i \vec{v} u) = \operatorname{div} (\mu_i \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i v) + \operatorname{div} (\rho_i \vec{v} v) = \operatorname{div} (\mu_i \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i w) + \operatorname{div} (\rho_i \vec{v} w) = \operatorname{div} (\mu_i \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Zi}; \quad (3)$$

уравнение неразрывности для жидкой среды

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho_i \vec{v}) = 0; \quad (4)$$

уравнение энергии для жидкой среды

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i c_i T) + \operatorname{div} (\rho_i c_i \vec{v} T) = \operatorname{div} (\lambda_i \operatorname{grad} T), \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  — давление, Па;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $c$  — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\vec{v}$  — вектор скорости;  $u, v, w$  — скорость в проекциях на оси координат  $x, y$  и  $z$ , м/с;  $T$  — температура, К;  $t$  — время, с;  $S_{Zi}$  — член, учитывающий массовые силы, которые действуют в направлении оси  $z$ , Н/м<sup>3</sup>.

В области  $\Omega_1$  (рабочее тело) не учитывается свободная конвекция теплоты и, следовательно,  $S_{Z1} = 0$ . При расчете областей  $\Omega_2$  (жидкость) и  $\Omega_3$  (воздух) учитывается свободная конвекция теплоты в приближении Буссинеска [1–4]:

$$S_{Zi} = -\rho_{0i} g \beta_{Ti} (T - T_{0i}), \quad i = 2, 3, \quad (6)$$

где  $\rho_{0i}$  — плотность жидкой среды при температуре  $T_{0i}$ ;  $\beta_{Ti}$  — температурный коэффициент объемного расширения жидкой среды.

При расчете областей  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$  под давлением, обозначаемым символом “ $p$ ”, понимается давление жидкой среды за вычетом гидростатического давления.

Задача решается в сопряженной постановке, поэтому к системе дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы в жидкой среде, необходимо добавить дифференциальное уравнение, описывающее процесс теплопроводности в твердом теле. Уравнение

теплопроводности для твердого тела получается из уравнения энергии для жидкой среды при условии, что  $\vec{v} = 0$  [1–4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i c_i T) = \operatorname{div} (\lambda_i \operatorname{grad} T) + S_{Ti}, \quad (7)$$

где  $S_{Ti}$  — член, учитывающий количество теплоты, выделяемое внутренними источниками в единице объема среды в единицу времени, Вт/м<sup>3</sup>.

В области  $\Omega_6$  (электрический нагреватель) происходит выделение теплоты вследствие протекания электрического тока и, следовательно,  $S_{T6} = Q$ . В областях  $\Omega_4$  (сосуд) и  $\Omega_5$  (стенки) отсутствуют внутренние источники теплоты и, следовательно,  $S_{T4} = S_{T5} = 0$ .

Областью определения системы уравнений (1)–(7) является область  $\Omega$  (см. рис. 2), состоящая из подобластей  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) и определяемая положением радиус-вектора в декартовой системе координат  $\mathbf{r}(x, y, z, t) \in \Omega$  или в цилиндрической системе координат  $\mathbf{R}(r, \theta, z, t) \in \Omega$ .

**Граничные условия.** На входе  $S_1$  в расчетную область  $\Omega$  заданы вектор скорости движения и температура рабочего тела (вектор скорости задается в цилиндрической системе координат):

$$u(\mathbf{R}) = |\vec{v}|, \quad v(\mathbf{R}) = w(\mathbf{R}) = 0, \quad T(\mathbf{R}) = T, \quad (8)$$

где  $(\mathbf{R}) \in S_1$ .

На выходе  $S_2$  из расчетной области  $\Omega$  задано нулевое изменение скорости и нулевое изменение температуры рабочего тела в направлении выхода:

$$\frac{\partial u}{\partial r}(\mathbf{R}) = \frac{\partial v}{\partial r}(\mathbf{R}) = \frac{\partial w}{\partial r}(\mathbf{R}) = \frac{\partial T}{\partial r}(\mathbf{R}) = 0, \quad (9)$$

где  $(\mathbf{R}) \in S_2$ .

На внешних границах  $S_3$  расчетной области  $\Omega$  задано нулевое значение скорости рабочего тела для уравнений движения и адиабатическое условие теплообмена для уравнения энергии:

$$u(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r}) = w(\mathbf{r}) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n}(\mathbf{r}) = 0, \quad (10)$$

где  $(\mathbf{r}) \in S_3$ .

На границах раздела  $S_4$  между жидкой средой и твердым телом задано нулевое значение скорости жидкой среды для уравнений движения:

$$u(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r}) = w(\mathbf{r}) = 0, \quad (11)$$

где  $(\mathbf{r}) \in S_4$ .

На границе раздела  $S_5$  между жидкостью  $\Omega_2$  и воздухом  $\Omega_3$  в сосуде задано условие непроницаемости для уравнений движения и условие

идеального теплового контакта для уравнения энергии:

$$w(\mathbf{r}) = 0, \quad R(\mathbf{r}) = 0, \quad (12)$$

где  $(\mathbf{r}) \in S_5$ .

**Начальные условия.** В начальный момент времени  $t = 0$  жидкая среда считается неподвижной, т.е.  $\vec{v} = 0$ . Также в начальный момент времени задано равномерное распределение температуры по объему жидкой среды и твердого тела  $T = 293$  К.

Условием окончания счета является достижение времени расчета заданного значения  $t = 60$  с.

**Решение.** Представленная система дифференциальных уравнений (1)–(7) с граничными условиями (8)–(12) решается численными методами. Для получения дискретного аналога используется метод контрольного объема в конечно-элементной постановке. Методы составления дискретных аналогов и методы решения полученной системы алгебраических уравнений приведены в работах [5–7].

**Исходные данные.** Физические свойства материалов при средней температуре  $T = 333$  К [8, 9] сведены в таблицу.

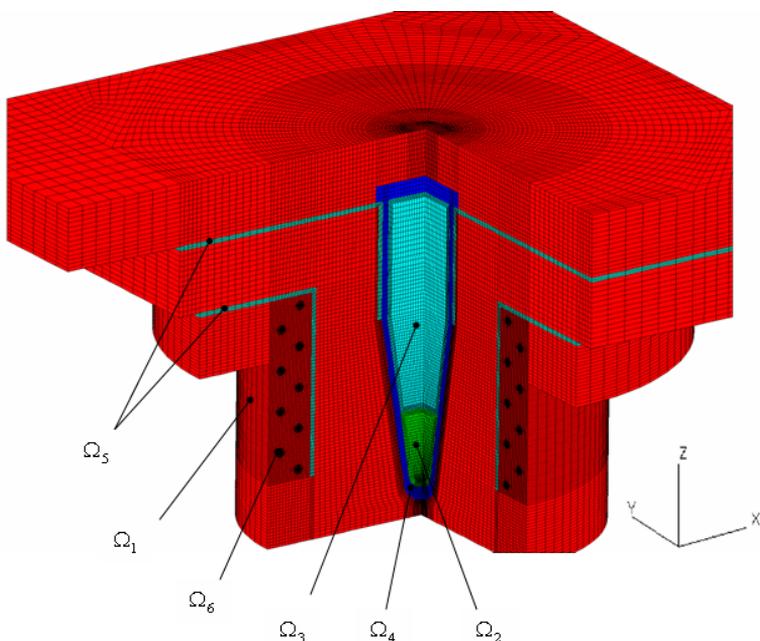
Таблица

**Физические свойства используемых материалов**

Область	Материал	Свойства материалов				
		$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta_T$ , 1/К	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , Дж/(кг·К)	$\mu$ , Па·с
$\Omega_1$	Воздух	1,060	–	0,029	1005	$20,1 \cdot 10^{-6}$
$\Omega_2$	Вода	998,2	$4,98 \cdot 10^{-4}$	0,659	4179	$469,9 \cdot 10^{-6}$
$\Omega_3$	Воздух	1,205	$2,69 \cdot 10^{-3}$	0,029	1005	$20,1 \cdot 10^{-6}$
$\Omega_4$	Полипропилен	900	–	0,2	1927	–
$\Omega_5$	Алюминиевый сплав Д16Т	2700	–	227	920	–
$\Omega_6$	Нихром	8800	–	12,6	448	–

Объемный расход воздуха в системе составляет  $G = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Площадь входного сечения  $S = 0,39 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Скорость рабочего тела на входе в расчетную область  $\vec{v} = G/S = 0,26$  м/с. Температура рабочего тела на входе в расчетную область  $T = 293$  К.

Электрическая мощность, подводимая к нагревателю,  $P = 10$  Вт. Объем материала нагревателя  $V = 3,76 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup> (общая длина проволоки нагревателя 0,5 м, диаметр проволоки нагревателя  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м). Количество теплоты, выделяемое в нагревателе в единице объема за единицу времени,  $Q = P/V = 2,66 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>.



**Рис. 3. Сетка расчетной области**

Толщина стенки сосуда  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м, толщина металлических стенок  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м. Объем жидкости в сосуде  $22 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>.

В результате разбиения расчетной области на конечные элементы получена расчетная сетка (рис. 3). Число элементарных ячеек составляет 1 043 472, число узлов 1 081 923. Расчет проводился с шагом 0,01 с, что составило 6000 шагов по времени.

В результате численного исследования были получены распределения температур, давлений и скоростей в элементах пневматической системы стабилизации температуры в каждый момент времени. В качестве примера на рис. 4, *а* и *б* приведены поля распределения температур и скоростей в расчетной области на 30-й секунде нагрева.

Результат численного исследования теплового поля жидкости и рабочего тела в процессе нагрева показан на рис. 5, из которого видно, что во время прогрева температура рабочего тела значительно отличается от температуры жидкости в сосуде. Следовательно, во время переходных процессов будет затруднительно регулировать температуру жидкости по температуре рабочего тела.

**Выводы.** В результате проведенных исследований создана математическая модель пневматической системы стабилизации температуры, позволяющая описывать тепловые переходные процессы, как в объекте с распределенными параметрами в трехмерной постановке.

На базе созданной математической модели проведены численные исследования нестационарных тепловых процессов в элементах системы.

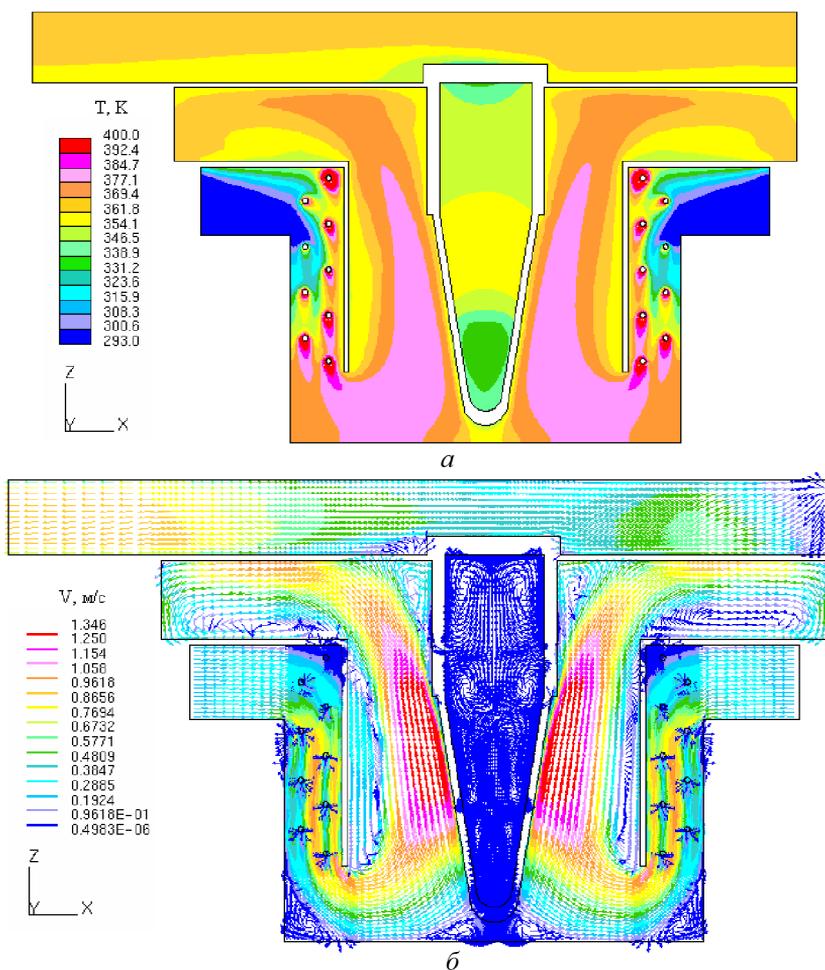


Рис. 4. Распределение температур (а) и скоростей (б) в расчетной области на 30-й секунде прогрева

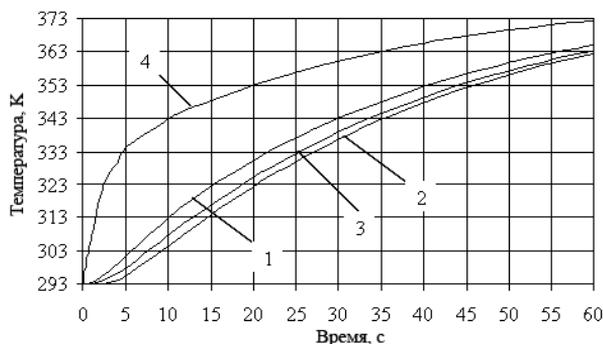


Рис. 5. Результаты численного исследования поля температур в процессе прогрева:

1 и 2 — температура зоны максимального и минимального прогрева жидкости; 3 — среднemasсовая температура жидкости; 4 — температура рабочего тела в непосредственной близости от сосуда

Результаты численного исследования демонстрируют, что во время переходных процессов скорость нагрева рабочего тела достигает 10 К/с, в то время как скорость нагрева реакционной смеси не превышает 2 К/с. В то же время разброс температур в микрообъеме реакционной смеси (22 мкл) достигает 7 К.

*Работа выполнена при частичной поддержке Госконтракта № 02.467.11.3005 с Федеральным агентством по науке и инновациям.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И с а ч е н к о В. П., О с и п о в а В. А., С у к о м е л А. С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. С а м а р с к и й А. А., В а б и щ е в и ч П. Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
3. С е б е с и Т., Б р э д ш о у П. Конвективный теплообмен / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
4. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Ч е р н ы ш е в А. В., Б е л о в а О. В. Метод решения сопряженной задачи конвективного теплообмена на примере термостатирующего устройства // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 1998. – № 4. – С. 77–87.
6. К ю р д ж и е в Ю. В. Моделирование рабочих процессов, разработка и модернизация пневматических систем и агрегатов с учетом образования конденсата рабочего тела // Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 163 с.
7. П а т а н к а р С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / Пер. с англ. Е.В. Калабина; Под ред. Г.Г. Янькова. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
8. Т е п л о т е х н и ч е с к и й справочник. В 2 т. / Под общ. ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 1976.
9. Ф и з и ч е с к и е величины: Справочник / А.П. Бичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. / Под ред. И.С. Григорьевы, Е.З. Михайлова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Статья поступила в редакцию 26.06.2007

Алексей Александрович Крутиков родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Аспирант кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области вычислительной гидродинамики и теплообмена.

A.A. Krutikov (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of computing hydrodynamics and heat exchange.

Константин Евгеньевич Демихов — д-р. техн. наук, профессор, первый проректор по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника”. Автор более 150 научных трудов в области вакуумной и компрессорной техники.

K.Ye. Demikhov — D. Sc. (Eng.), professor, first pro-rector for scientific work, head of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of vacuum and compressor technology.

Андрей Владимирович Чернышев родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1977 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области теплофизики, теории и расчета пневматических систем.

A.V. Chernyshov (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1977. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of thermal physics, theory and design of pneumatic systems.

Ольга Владимировна Белова родилась в 1971 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1994 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области вычислительной гидродинамики и теплообмена.

O.V. Belova (b. 1971) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1994. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of computing hydrodynamics and heat exchange.

Игорь Алексеевич Смирнов родился в 1947 г. Зав. лабораторией ГНЦ РФ – ИМБП РАН, канд. техн. наук. Автор ряда научных работ в области теоретических и экспериментальных исследований искусственной газовой среды.

I.A. Smirnov (b. 1947) – head of laboratory of “IMBP” of RAS, Ph. D. (Eng.). Author of some publications in the field of theoretical and experimental study of artificial gas medium.

---

### **ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”**

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

**Журнал “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.**

Главный редактор журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” – ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор И.Б. Федоров.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

### **Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”**

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана”:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Тел.: (495) 263-62-60; 263-60-45. Факс: (495) 261-45-97. E-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)