УДК 536.33:536.244

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА ОДНОЙ ИЗ ГРАНИЦ

В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Н.И. Куриленко¹, Г.Я. Мамонтов²

Томский политехнический университет ¹Тюменский государственный архитектурно-строительный университет ²Томский государственный архитектурно-строительный университет E-mail: Tania@tpu.ru

Приведены результаты численного решения задачи теплопереноса в замкнутой прямоугольной области в режиме свободной конвекции с использованием модели сопряженного теплообмена. В качестве источника нагрева рассмотрен газовый инфракрасный излучатель, расположенный горизонтально в верхней части области моделирования. Плоская нестационарная задача решена в рамках модели Навье–Стокса для газа и теплопроводности для твердых стенок. Проведен анализ динамики распространения тепла в замкнутой области с течением времени. Установлено, что большая часть тепла аккумулируется в ограждающих конструкциях, на которые воздействует тепловое излучение. Сделаны выводы о целесообразности применения сформулированной модели для расчета теплопереноса при наличии источника радиационного нагрева. Показана возможность использования потенциала теории сопряженного теплообмена при решении типичных задач промышленной теплоэнергетики.

Ключевые слова:

Сопряженный теплоперенос, численное моделирование, турбулентная естественная конвекция, газовые инфракрасные излучатели.

Введение

Общая теория сопряженного теплообмена, разработанная еще авторами [1-3] достаточно фундаментально, до настоящего времени не применяется широко при решении типичных задач промышленной теплоэнергетики и тепловой защиты. Во многом это обусловлено, с одной стороны, трудностями численного решения уравнений Навье-Стокса для газов или жидкостей, являющихся теплоносителями (или охладителями) в каких-либо теплотехнических системах. С другой стороны, достаточно часто на границах раздела сред можно при моделировании теплообмена использовать граничные условия третьего рода (а не четвертого) с введением в рассмотрение коэффициентов теплообмена, определяемых по результатам специальных экспериментов [4, 5] или рассчитываемых с использованием определенных полуэмпирических выражений [6, 7].

Но развитие техники [8] создает объективные предпосылки использования, например, для обеспечения теплового режима промышленных объектов, новых технических устройств, систем и технологий, основой которых являются также процессы преобразования энергии [9, 10], для моделирования которых недостаточно балансных моделей [11] или математических моделей динамических систем [12]. Типичным и достаточно наглядным примером таких технологий промышленной теплоэнергетики является система теплоснабжения на основе газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) [9, 10]. В таких системах энергия радиационных источников нагрева аккумулируется в тонких приповерхностных слоях ограждающих конструкций и затем используется для формирования конвективных потоков, обеспечивающих нагрев рабочих зон производственных помещений. Используемые

до настоящего времени подходы к анализу тепловых режимов объектов с системами теплоснабжения на базе ГИИ [13, 14] не учитывают конвекцию вообще и теплоотвод в ограждающие конструкции в частности.

В то же время в последние годы интенсивно разрабатывалась теория сопряженного теплопереноса в замкнутых областях с локальными источниками подвода теплоты и теплоотводом в твердые стенки, ограждающие внутреннюю область, заполненную воздухом [15-18]. Для задач естественной и смешанной конвекции [15-18] установлены масштабы влияния теплоотвода в ограждающие конструкции на температурные поля области моделирования теплопереноса. В дальнейшем возможность применения разработанного в [15-18] математического аппарата была продемонстрирована при решении задач теплопереноса в условиях зажигания горючих жидкостей при локальном нагреве [19, 20] и интенсивном парообразовании. Представляет интерес анализ возможности применения моделей сопряженного теплообмена [15-20] при описании температурных полей объектов с системами отопления на базе ГИИ.

Цель настоящего исследования — математическое моделирование конвективно-кондуктивного теплопереноса в воздушной области, огражденной твердыми стенками, с использованием подхода [15–18] и анализ распределения аккумулированной в различных зонах рассматриваемой типичной системы «воздух-ограждающие конструкции» теплоты.

Постановка задачи и метод решения

Для реализации поставленной цели рассматривалась область прямоугольного поперечного сечения (рис. 1). Внутренняя зона области решения $(L_{\pi} < X < L_{\Pi} \space H_{H} < Y < H_{B})$ заполнена воздухом – 1. По внешнему контуру расположены ограждающие конструкции, выполненные из бетона – 2 и современных строительных материалов с низким коэффициентом теплопроводности – 3. Применение последних соответствует перспективным энергосберегающим технологиям и в настоящее время находит все большее применение в строительстве.



Рис. 1. Область решения рассматриваемой задачи: 1) воздух, 2) ограждающие конструкции из бетона, 3) ограждающие конструкции из современного строительного материала с малым коэффициентом теплопроводности

Источник радиационного нагрева в верхней части $H_{\rm B}$ области решения не выделялся – принималось, что его толщина мала по сравнению с характерными размерами области. Интенсивность излучения считалась равномерно распределенной по поперечной координате X.

При постановке задачи предполагалось, что вся энергия инфракрасного излучателя поступает к нижней границе $H_{\rm H}$, разделяющей нижнее бетонное основание – 2 и область нагрева – 1. Воздух принимался диатермически прозрачной средой. В качестве основного механизма теплопереноса в газе рассматривались турбулентная естественная конвекция, в ограждающих конструкциях – теплопроводность.

Математическая модель и метод решения

В качестве базовой системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс естественной конвекции в рассматриваемой области (рис. 1) в режиме сопряженного теплопереноса, принята математическая модель [15, 16], разработанная для описания процессов конвекции и теплопроводности в замкнутой прямоугольной области с теплопроводными стенками и локальным источником нагрева на нижней границе и развитой в дальнейшем для решения задач смешанной конвекции при зажигании жидкостей в условиях локального нагрева [19, 20].

В качестве масштаба расстояния была выбрана ширина рассматриваемой области решения *L*. Для приведения системы уравнений к безразмерному виду использовались следующие соотношения:

$$X = \frac{x}{L}, \ Y = \frac{y}{L}, \ \tau = \frac{t}{t_0}, \ U = \frac{u}{V_0}, \ V = \frac{v}{V_0},$$
$$\Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \ \Psi = \frac{\psi}{\psi_0}, \ \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}, \ V_0 = \sqrt{g\beta\Delta TL},$$
$$\Delta T = T_{it} - T_0, \ \psi_0 = V_0 L, \ \omega_0 = \frac{V_0}{L},$$

где x, y – координаты, м; u, υ – скорости по осям x, y, м²/c; X, Y – безразмерные декартовы координаты; τ – безразмерное время; t – время, c; t₀ – масштаб времени, c; U, V – безразмерные скорости; V₀ – масштаб скорости (скорость конвекции), м²/c; Θ – безразмерная температура; T – температура, K; T₀ – температура газа и твердого тела в начальный момент времени, K; T_{it} – масштаб температуры, K; g – ускорение свободного падения, м/c²; β – термический коэффициент объемного расширения, K⁻¹; ψ – функция тока, м²/c; ψ_0 – масштаб функции тока, м²/c; Ψ – безразмерный аналог ψ ; ω – вихрь скорости, 1/с; ω_0 – масштаб вихря скорости, 1/с; Ω – безразмерный аналог ω .

Математическая постановка задачи в безразмерных переменных включает следующие уравнения:

$$\frac{1}{\mathrm{Sh}}\frac{\partial\Omega}{\partial\tau} + U\frac{\partial\Omega}{\partial X} + V\frac{\partial\Omega}{\partial Y} =$$
$$= \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\mathrm{Gr}}}\right)\Omega \right] + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\mathrm{Gr}}}\right)\Omega \right] + \frac{1}{2}\frac{\partial\Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -2\Omega,$$
(2)

$$\frac{1}{\mathrm{Sh}}\frac{\partial\Theta}{\partial\tau} + U\frac{\partial\Theta}{\partial X} + V\frac{\partial\Theta}{\partial Y} = \\ = \frac{\partial}{\partial X} \left[\left(\frac{1}{\mathrm{Pr}\sqrt{\mathrm{Gr}}} \right) \Theta \right] + \frac{\partial}{\partial X} \left[\left(\frac{1}{\mathrm{Pr}\sqrt{\mathrm{Gr}}} \right) \Theta \right], \qquad (3)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}}\frac{\partial\Theta}{\partial\tau} = \frac{\partial^2\Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\Theta}{\partial Y^2}.$$
 (4)

Начальные условия для системы уравнений (1)-(4):

$$\Psi(X, Y, 0) = \Omega(X, Y, 0) = 0,$$
 (5)
$$\Theta(X, Y, 0) = 0.$$

Граничные условия на внешних границах области решения:

$$\frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0, \tag{6}$$

при

$$Y = 0, \ 0 < X < 1, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0};$$
$$Y = \frac{H}{L}, \ 0 < X < 1, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0}.$$

$$\frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0, \tag{7}$$

при

$$X = 0, \ 0 < Y < \frac{H}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0};$$

$$X = 1, \ 0 < Y < \frac{H}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0}.$$

На границах раздела твердых стенок и газа выполняются условия:

$$\frac{\partial \Psi(X,Y,\tau)}{\partial Y} = 0, \ \frac{\partial \Theta_1(X,Y,\tau)}{\partial Y} = \lambda_{1,2} \frac{\partial \Theta_2(X,Y,\tau)}{\partial Y}, \\ \Theta_1(X,Y,\tau) = \Theta_2(X,Y,\tau),$$
(8)

при $Y = \frac{H_{\rm B}}{L}, \ \frac{L_{\rm I}}{L} < X < \frac{L_{\rm II}}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0};$

$$\frac{\partial \Psi(X,Y,\tau)}{\partial X} = 0, \ \frac{\partial \Theta_1(X,Y,\tau)}{\partial X} = \lambda_{1,3} \frac{\partial \Theta_3(X,Y,\tau)}{\partial X}, \Theta_1(X,Y,\tau) = \Theta_3(X,Y,\tau),$$
(9)

при

$$X = \frac{L_{\Pi}}{L}, \ \frac{H_{H}}{L} < Y < \frac{H_{B}}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_{0}},$$
$$X = \frac{L_{\Pi}}{L}, \ \frac{H_{H}}{L} < Y < \frac{H_{B}}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_{0}}.$$

На границе $H_{\rm H}$ учитывается радиационный источник нагрева

$$\frac{\partial \Psi(X,Y,\tau)}{\partial Y} = 0,$$

$$\frac{\partial \Theta_1(X,Y,\tau)}{\partial Y} = \frac{\partial \Theta_2(X,Y,\tau)}{\partial Y} + \text{Ki}, \quad (10)$$

$$\Theta_1(X,Y,\tau) = \Theta_2(X,Y,\tau),$$

при $Y = \frac{H_{\rm H}}{L}, \ \frac{L_{\rm I}}{L} < X < \frac{L_{\rm II}}{L}, \ 0 < \tau < \frac{t}{t_0},$

где Sh= $V_0 t_0/L$ – число Струхаля; Кі= $qL^3/\lambda(T_{it}-T_0)$ – число Кирпичева; λ – коэффициент теплопроводности твердой стенки, Вт/(м·К); Gr= $g\beta L^3(T_{it}-T_0)/v_t^2$ – число Грасгофа; g – ускорение, создаваемое массовыми силами, м/с²; L – ширина области решения, м; H – высота области решения, м; v_t – кинематический коэффициент молярной (турбулентной) вязкости, м²/с; $\lambda_{1,2}$ и $\lambda_{1,3}$ – относительные коэффициенты теплопроводности; $\Pr = v_t/a$ – число Прандтля; Fo= at_0/L^2 – число Фурье; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Уравнения (1)–(4) с соответствующими начальными и граничными условиями (5)–(10) решались методом конечных разностей на равномерной сетке. При определении граничных условий для вектора вихря применялся метод Либмана [21] и формула Вудса [22]. Для решения системы разностных уравнений использована схема переменных направлений. При решении задачи (1)–(12) использовался алгоритм [15–17], разработанный для численного решения задач естественной конвекции в замкнутых прямоугольных областях с локальными источниками энергии. Турбулизация течения нагретого воздуха учитывалась в соответствии с основными положениями [21, 22], изменением вязкости с ростом скорости движения воздуха. Расчет вязкости проведен в рамках модели Прандтля [23]:

$$v_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \overline{\upsilon}_x}{\partial y} \right|$$
$$l_m = ky,$$

где l_m – длина пути смешения; k – универсальный коэффициент пропорциональности, не зависящий от числа Рейнольдса [23].

Анализ результатов численного моделирования

Основные численные исследования проведены при следующих значениях безразмерных и размерных величин: $t_0=0,1$ с, $T_0=293$ K, $T_{it}=303$ K, Ki=60, 10^6 <Gr< 10^{11} . При таких временах, как показали результаты численного анализа, достаточно отчетливо проявляются все основные закономерности рассматриваемых процессов.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования, иллюстрирующие основные закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе отопления с использованием газовых инфракрасных излучателей.

Представленные иллюстрации (рис. 2) хорошо демонстрируют нестационарный характер процесса теплопереноса в рассматриваемой области решения.

Нагретый вблизи нижнего бетонного основания воздух поднимается по центру рассматриваемой области решения и затем, охлаждаясь при обтекании верхней ограждающей конструкции, перемещается вниз (рис. 2, a, e, ∂). В итоге формируется симметричное циркуляционное течение относительно оси X=0,5 (рис. 2, б, г, е). В начальный момент времени можно выделить лишь центральный восходящий поток теплого воздуха (рис. 2, *a*). Но с течением времени (рис. 2, в) происходит формирование вторичных вихревых образований вблизи вертикальных границ $L_{\rm III}$ и $L_{\rm IIII}$, что связано с очень малым оттоком тепла в боковые ограждающие конструкции (максимальное значение Θ =0,09 в сечении Y=H_н при τ=70000), выполненные из современных строительных материалов с низким коэффициентом теплопроводности. Также следует отметить, что с увеличением перепадов температур в воздушной среде как по вертикальной, так и по горизонтальной координатам происходит увеличение подъемной силы, и как следствие растет скорость (рис. 2, е) циркуляции воздушных масс. За счет этого происходит интенсивное закручивание воздуха (рис. 2, ∂) и заметно появление вторичных вихрей относительно центрального потока. Интенсивная турбулизация способствует перераспреде-



Рис. 2. Поля температур (а, в, д) и изолинии функции тока (б, г, е) для модели естественной конвекции в замкнутой области с радиационным нагревом нижней границы раздела «газ – твердая стенка» при различных *τ*: а, б) 10000; в, г) 50000; д, е) 70000

лению тепла по всему воздушному объему. В нижней его части формируется слой высотой около H=0,1 с постоянной температурой практически по всей ширине газовой области (рис. 2, ∂). В верхних воздушных слоях наблюдается некоторое снижение температур, что является следствием оттока тепла в верхнюю ограждающую конструкцию.

С целью ответа на вопрос о целесообразности применения достаточно сложных моделей сопряженного теплообмена при решении задач теплоснабжения проведен расчет количества теплоты, аккумулированной ограждающими конструкциями и воздухом на глубину рассматриваемой области в 1 м (таблица) с использованием температурных полей, рассчитанных при решении задачи (1)-(10).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что значительная часть энергии расходуется на нагрев ограждающих конструкций (таблица) (большая часть тепловой энергии, поступающей от газовых инфракрасных излучателей, аккумулируется в твердотельных элементах области решения). Поэтому расчет тепловых режимов помещений с системами отопления на базе ГИИ необходимо проводить путем решения задач свободной конвекции в сопряженной постановке с учетом теплоотвода в ограждающие конструкции и аккумуляции в них энергии. Балансные модели [13, 14] при этом могут служить инструментом для нижних оценок энергии, необходимой для эффективного использования систем радиационного нагрева.

Таблица. Тепловая энергия, аккумулированная в ограждающих конструкциях (Q₁) и в воздушной среде (Q₂)

102	O 106 D	O 10 ⁴ D
τ , 10 ³	<i>Q</i> 1, Ю°Дж	Q ₂ , Ю'Дж
10	5,31	3,53
20	6,05	4,47
30	6,77	5,17
40	7,46	5,46
50	8,14	5,87
60	8,79	5,45
70	9,44	4,63

Выводы

На основании сопоставления температурных полей объекта теплоснабжения, установленных по результатам численного моделирования с использованием модели сопряженного теплообмена, показана необходимость использования моделей, учитывающих конвекцию и теплоотвод в ограждающие конструкции. Полученные результаты ил-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лыков А.В. Сопряженные задачи конвективного теплообмена // Проблема тепло- и массопереноса: Сб. научн. трудов ИТ-МО АН БССР им. А.В. Лыкова. – Минск: Наука и техника, 1976. – С. 83–98.
- Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
- Лыков А.В., Алексашенко А.А., Алексашенко В.А. Сопряженные задачи конвективного теплообмена. – Минск: Изд-во БГУ, 1971. – 126 с.
- Матюхов Д.В., Низовцев М.И., Терехов В.И, Терехов В.В. Определение теплозащитных характеристик теплоинерционных ограждающих конструкций зданий // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 7. – С. 120–127.
- Terekhov V.I., Pakhomov M.A., Sharov K.A., Shishkin N.E. Thermal efficiency of near-wall gas-droplet screens II. Experimental study and comparison with numerical results // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2005. - V. 48. -№ 9. - P. 1760-1771.
- Cengel Yu.A., Chajar A.J. Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications. 4th ed. - New York: McGraw-Hill, 2011. -905 p.
- Кудинов А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
- Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М. Научные основы технологий XXI века. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 136 с.
- Давлятчин Р.Р., Куриленко Н.И. Лучисто-конвективный теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 2. – С. 74–78.
- Куриленко Н.И., Давлятчин Р.Р. Теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4. – С. 132–141.
- Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1970. – 376 с.
- Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

люстрируют перспективы использования моделей сопряженного теплопереноса [15–18] при решении типичных задач анализа тепловых режимов объектов теплоснабжения с газовыми инфракрасными излучателями.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

- Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – Вып. 4. – С. 23–25.
- 14. Бухмиров В.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Экспериментальное исследование системы отопления и инфракрасными излучателями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – Вып. 3. – С. 12–16.
- Вавилов В.П., Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Математическое моделирование термогравитационной конвекции в сопряженной постановке в замкнутой области // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 104–109.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modelling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // Thermophysics and Aeromechanics. – 2009. – V. 16. – № 1. – P. 119–128.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Numerical simulation of doublediffusive conjugate natural convection in an enclosure // International Journal of Thermal Sciences. – 2011. – V. 50. – № 10. – P. 1878–1886.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment // Russian Microelectronics. – 2008. – V. 37. – № 2. – P. 131–138.
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and mass transfer at ignition of liquid fuel droplets spreading over the surface of massive hot bodies // Journal of Engineering Thermophysics. - 2010. -V. 19. - № 2. - P. 75-84.
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics // Journal of Engineering Thermophysics. -2009. - V. 18. - № 2. - P. 162-167.
- Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. – 616 с.
- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
- Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Типография БГТУ, 2001. 108 с.

Поступила 21.08.2013 г.

UDC 536.33:536.244

NUMERICAL INVESTIGATION OF CONJUGATE NATURAL CONVECTION IN CLOSED REGION UNDER RADIATION HEATING OF ONE BOUNDARY

V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, N.I. Kurilenko¹, G.Ya. Mamontov²

Tomsk Polytechnic University Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering Tomsk State University of Architecture and Building

The paper introduces the results of numerical solution of heat transfer problem in closed rectangular region in free convection using the conjugate heat transfer model. Gas infrared emitters arranged horizontally in upper part of simulation region have been considered as the heating source. Plane non-stationary problem was solved within the Navier–Stokes model for gas and heat transfer for solid boundaries. The dynamics of heat distribution in closed region with time was analyzed. It was ascertained that the most of heat is accumulated in enclosures affected by heat radiation. The authors made the conclusion on the stated model applicability for heat transfer calculation with radiation heating source. The paper demonstrates the possibility of using the potential of conjugate heat transfer theory when solving typical problems of heat power industry.

Key words:

Conjugate heat transfer, numerical simulation, turbulent free convection, gas infrared emitters.

REFERENCES

- Lykov A.V. Sopryazhennye zadachi konvektivnogo teploobmena. *Problema teplo- i massoperenosa*. Sbornik nauchnykh trudov IT- MO AN BSSR im. A.V. Lykova (Adjoin problems of convective he- at exchange. Problem of heat- and mass transfer). Minsk, Nauka i tekhnika, 1976. pp. 83–98.
- Lykov A.V. Teplomassoobmen (Heat-and-mass transfer). Moscow, Energiya, 1978. 479 p.
- Lykov A.V., Aleksashenko A.A., Aleksashenko V.A. Sopryazhennye zadachi konvektivnogo teploobmena (Adjoin problems of convective heat exchange). Minsk, BGU, 1971. 126 p.
- Matyukhov D.V., Nizovtsev M.I., Terekhov V.I, Terekhov V.V. Izvestiya vuzov. Stroitelstvo, 2002. 7, pp. 120–127.
- Terekhov V.I., Pakhomov M.A., Sharov K.A., Shishkin N.E. Thermal efficiency of near-wall gas-droplet screens II. Experimental study and comparison with numerical results. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. 48, 9, pp. 1760–1771.
- Cengel Yu.A., Chajar A.J. Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications. 4th ed. New York, McGraw-Hill, 2011. 905 p.
- Kudinov A.A. Energosberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh (Energy saving in heat power engineering and heat technologies). Moscow, Mashinostroenie, 2011. 374 p.
- Leontyev A.I., Pilyugin N.N., Polezhaev Yu.V., Polyaev V.M. Nauchnye osnovy tekhnologiy XXI veka (Scientific basis of technologies in XXI century). Moscow, Energomash, 2000. 136 p.
- Davlyatchin P.P., Kurilenko N.I. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal, 2009. 2, pp. 74–78.
- Kurilenko N.I., Davlyatchin R.R. Vestnik TGASU, 2009. 4, pp. 132-141.
- 11. Bogoslovskiy V.N. *Stroitelnaya teplofizika* (Building thermal physics). Moscow, Vysshaya shkola, 1970. 376 p.
- 12. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy (Mathematical

modeling and optimization of thermal efficiency of buildings). Moscow, AVOK-PRESS, 2002. 194 p.

- Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A., Solnyshkova Yu.S. Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta, 2010. 4, pp. 23-25.
- Bukhmirov V.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V. Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta, 2011. 3, pp. 12–16.
- Vavilov V.P., Kuznetscov G.V., Sheremet M.A. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2005. 308, 5, pp. 104–109.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modelling of complex heat transfer in a rectangular enclosure. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009. 16, 1, pp. 119–128.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Anumerical simulation of double-diffusive conjugate natural convection in an enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011. 50, 10, pp. 1878-1886.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment. *Russi*an Microelectronics, 2008. 37, 2, pp. 131–138.
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and mass transfer at ignition of liquid fuel droplets spreading over the surface of massive hot bodies. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010. 19, 2, pp. 75-84.
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009. 18, 2, pp. 162-167.
- 21. Rouch P.J. Vychislitelnaya gidrodinamika (Computational fluid dynamics). Moscow, Mir, 1980. 616 p.
- Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena (Simulation of heat- and masstransfer). Moscow, Nauka, 1984. 288 p.
- Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnykh techeniy (Modeling turbulent flows). Saint Petersburg, BGTU, 2001. 108 p.