

Численное решение сопряженной задачи газодинамики и теплообмена для воздухозаборной решетки с противообледенительной системой

© Ю.И. Димитриенко, М.Н. Коряков, В.Ю. Чибисов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Работа посвящена моделированию сопряженных процессов обтекания потоком холодного воздуха и теплообмена между потоком и корпусом воздухозаборной решетки с противообледенительной системой нагрева. Моделирование осуществляется с помощью программного комплекса Sigma, разработанного на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Проведено параметрическое численное исследование режимов обтекания и теплообмена при различных скоростях и температурах потока, в результате которых определены мощности системы обогрева, обеспечивающие поддержание температуры корпуса решетки в заданном режиме. Разработанная методика и результаты численного моделирования могут быть использованы для проектирования противообледенительных систем, в том числе для морских судов, эксплуатирующихся в арктических условиях.

Ключевые слова: *противообледенительные системы, воздухозаборные решетки, численное моделирование, сопряженные задачи газодинамики и теплообмена.*

Введение. Для морских судов, осуществляющих плавание в высоких арктических широтах, существует проблема борьбы с нарастанием льда на различных судовых конструкциях [1–4]. Особую проблему составляет обледенение воздухозаборных решеток (ВЗР) судовой системы вентиляции. Обледенение решеток сужает поперечное сечение воздухозаборных трактов, уменьшает количество воздуха, поступающего на различные судовые системы, и в отдельных случаях может вывести их из строя. Для борьбы с обледенением ВЗР разрабатывают специализированные противообледенительные системы обогрева (ПСО) [3–5]. Вопросы моделирования процессов обледенения рассматривались в [6], однако задача совместного моделирования процессов обтекания ВЗР с ПСО холодным потоком воздуха и процессов теплообмена в этих системах не рассматривались. Настоящая работа посвящена моделированию сопряженных процессов газодинамики и теплообмена в конструкциях ВЗР с ПСО.

Сопряженная задача газодинамики и теплообмена для воздухозаборной решетки с противообледенительной системой. Фрагмент конструкции ВЗР с разрабатываемой ПСО показан на рис. 1. ВЗР представляет собой систему жалюзи, соединенных между собой опорными пустотелыми стойками, в которых проложены греющие электрокабели.

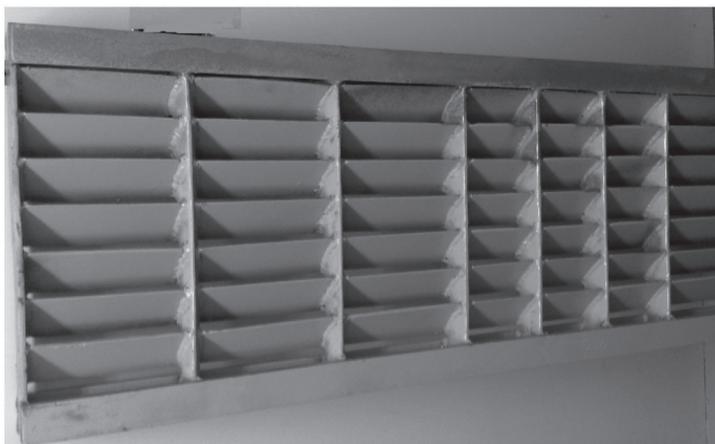


Рис. 1. Фрагмент ВЗР с ПСО

Для расчета теплообмена в конструкции жалюзи с внутренним обогревом от электронагревателей необходим расчет конвективного теплового потока, отводимого от поверхности жалюзи при воздействии холодного воздушного потока, а также расчет коэффициента конвективного теплообмена между поверхностью корпуса ВЗР и холодным воздушным потоком. Для моделирования процессов теплообмена на ВЗР рассматривается постановка сопряженной задачи газодинамики воздушного потока, обтекающей конструкцию, и теплопроводности стенки конструкции с условиями внутреннего электроподогрева. Эта задача в общей постановке состоит из системы уравнений динамики линейно-вязкого теплопроводного газа (образованной из уравнения неразрывности, уравнений движения, уравнения энергии и определяющих соотношений), описывающей движение холодных воздушных масс на поверхности жалюзи ВЗР [7–9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p \mathbf{E} - \mathbf{T}_v) = 0, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho E + p) \mathbf{v} - \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{v} + \mathbf{q}) = 0, \quad \mathbf{x} \in V_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p &= R\rho\theta, \quad e = c_v\theta, \quad E = e + |\mathbf{v}|^2 / 2, \\ \mathbf{T}_v &= \mu_1(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{E} + \mu_2(\nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \otimes \mathbf{v}^T), \\ \mathbf{q} &= -\lambda \nabla \theta, \quad \mathbf{x} \in V_1, \end{aligned} \quad (2)$$

а также уравнения теплопроводности корпуса ВЗР

$$\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla \theta), \quad \mathbf{x} \in V_2, \quad (3)$$

где ρ — плотность газа; t — время; E — плотность полной энергии газа: $E = c_v \theta + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2}$; c_v — теплоемкость газа при постоянном объеме; θ — температура газа; $|\mathbf{v}|^2 = v^i v_i$ — квадрат модуля скорости; p — давление; R — газовая постоянная ($R = \mathbb{R}/\mu$, μ — молекулярная масса газа; \mathbb{R} — универсальная газовая постоянная); \mathbf{E} — метрический тензор; \mathbf{T}_v — тензор вязких напряжений в газе; \mathbf{q} — вектор потока тепла; μ_1, μ — коэффициенты вязкости газа (полагаем далее $\mu_1 = -\frac{2}{3}\mu_2$); λ — коэффициент теплопроводности газа; ρ_s, c_s, λ_s — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала корпуса ВЗР; ∇ — набла-оператор Гамильтона [10], V_1 — условная область воздушного потока, обтекающего ВЗР; V_2 — область конструкции ВЗР.

Рассмотрим 4 случая граничных условий для системы уравнений (1)–(3).

1. На границе Σ_1 раздела областей V_1 и V_2 , представляющей собой твердую непроницаемую стенку (поверхность корпуса ВЗР), ставятся условия прилипания, баланса теплового потока и равенства температур воздушного потока и твердой стенки:

$$\mathbf{v} = 0, \quad \lambda \nabla \theta|_{\Sigma_{1-}} \cdot \mathbf{n} = \lambda_s \nabla \theta|_{\Sigma_{1+}} \cdot \mathbf{n} + \varepsilon_s \sigma \theta_w^4, \quad \theta|_{\Sigma_{1-}} = \theta|_{\Sigma_{1+}}. \quad (4)$$

2. На дозвуковой границе Σ_2 входа воздушного потока в область V_1 задаются следующие условия:

$$\rho = \rho_e, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_e, \quad \theta = \theta_e. \quad (5)$$

3. На дозвуковой границе Σ_3 выхода воздушного потока из области V_1 задаются условия

$$\rho = \rho_e, \quad \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad (6)$$

где $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial n} = \mathbf{n} \cdot \nabla \otimes \mathbf{v}$ — нормальная производная вектора скорости.

4. На внутренней (нагреваемой) границе Σ_4 твердой стенки задаются условия теплового притока

$$-\lambda_s \nabla \theta|_{\Sigma_4} \cdot \mathbf{n} = q_w, \quad (7)$$

где q_w — заданный тепловой поток, подводимый за счет электронагрева; ϵ_s — интегральный коэффициент теплового излучения твердой поверхности; σ — коэффициент Стефана—Больцмана.

Начальные условия к системе (1)–(3) имеют вид

$$t = 0: \rho(0, x^i) = \rho^0, \quad \mathbf{v}(0, x^i) = 0, \quad E(0, x^i) = c_v \theta_0, \quad (8)$$

где ρ^0, θ^0 — заданные значения.

Метод численного решения сопряженной задачи газодинамики и теплообмена. Численное решение сопряженной задачи (1)–(8) осуществлялось в модельной двумерной постановке — рассмотрено нормальное сечение одной опорной стойки ВЗР ПСО (рис. 2), в которой области решения V_1 и V_2 ограничены двумя концентрическими эллипсам.

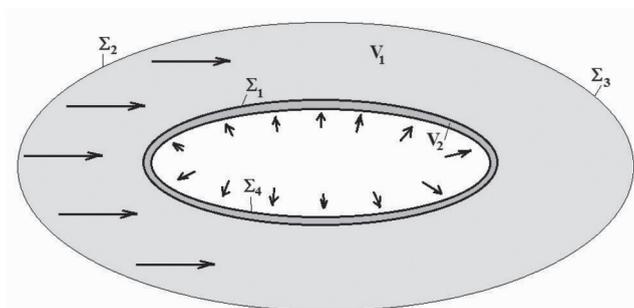


Рис. 2. Модель опорной стойки ВЗР ПСО, обтекаемой воздушным потоком, примененная для решения сопряженной задачи в двумерной постановке

Для численного решения сопряженной задачи был применен следующий метод: вводился итерационный цикл по «медленному» времени $\bar{t} = t/t_0$, соответствующему процессу распространения тепла в стенке конструкции ВЗР, где t_0 — характерное время нагрева конструкции. Внутри этого цикла введено «быстрое» время $\tau = t/t_y$, где t_y — характерное время установления течения газового потока. На каждом n -м шаге итерации по медленному времени $\bar{t}_{(n)}$ расчет осуществлялся в четыре этапа: 1) выбиралась температура $\theta_{w(n)}$ поверхности конструкции на n -м шаге, с этой температурой методом установления решались системы уравнений газодинамики (1), (2) с граничными условиями (5), (6), а вместо (4) задавались условия

$$\mathbf{v} = 0, \quad \theta|_{\Sigma_{\pm}} = \theta_{w(n)}; \quad (9)$$

2) в результате вычислялась температура в области V_1 газа, в том числе температура θ_e на внешней условной границе пристеночного вязкого

газового слоя, а также тепловой поток от воздушной среды к твердой поверхности конструкции $q_- = -\lambda \nabla \theta|_{\Sigma_-} \cdot \mathbf{n}$ и коэффициент теплообмена $\alpha = \frac{q_-}{\theta_e - \theta_{w(n)}}$; 3) составлялось уравнение теплового баланса на твердой поверхности конструкции ВЗР (второе уравнение системы (4)), которое рассматривалось как нелинейное алгебраическое уравнение для вычисления температуры $\theta_{w(n)}$ поверхности на следующем шаге итерации

$$\alpha(\theta_e - \theta_{w(n+1)}) = \alpha_s(\theta_{w(n+1)} - \theta_0) + \varepsilon_s \sigma \theta_{w(n+1)}^4. \quad (10)$$

Здесь использованы уравнения Ньютона для тепловых потоков $q_- = \alpha(\theta_e - \theta_{w(n+1)})$ и $q_+ = \alpha_s(\theta_{w(n+1)} - \theta_0)$, где α_s — коэффициент теплообмена в твердой стенке, способ вычисления которого изложен ниже; 4) решалось уравнение теплопроводности (3) с граничным условием заданной температуры $\theta|_{\Sigma_+} = \theta_{w(n+1)}$. Далее осуществлялся переход на следующий $(n + 1)$ шаг итерационного цикла.

Уравнение теплопроводности (3) с граничными условиями (7) и $\theta|_{\Sigma_+} = \theta_{w(n+1)}$ решалось конечно-разностным методом в криволинейных координатах, одна из которых — X_1 — связана с обтекаемой поверхностью корпуса ВЗР, а вторая — X_2 — ориентирована по нормали к этой поверхности. Вводятся l_0 — характерное значение координаты X_1 , и h — координаты X_2 , в качестве которого выбирается толщина конструкции ВЗР, а также A_a^0 — характерные значения коэффициентов квадратичной формы срединной поверхности оболочечной конструкции жалюзи, температуры θ_0 , а также соответствующие им безразмерные величины

$$\bar{X}_1 = X_1 A_1^0 / l_0, \quad \bar{X}_2 = X_2 / h, \quad \bar{A}_1 = \frac{A_1}{A_1^0}, \quad \bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_0}, \quad \bar{q}_w = \frac{q_w h}{\lambda_s \theta_0}. \quad (11)$$

Тогда уравнение (3) теплопроводности в безразмерном виде в двумерной постановке можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = \frac{F_0 \beta^2}{\bar{A}_1} \left(\frac{\partial}{\partial \bar{X}_1} \left(\frac{1}{\bar{A}_1} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_1} \right) \right) + F_0 \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2^2}, \quad (12)$$

где $F_0 = \frac{\lambda_s t_0}{\rho_s c_s h^2}$ — критерий Фурье, $\beta = \frac{h}{l_0}$.

Граничные условия (4), (7) и начальные условия (8) в безразмерном виде следующие:

$$\begin{aligned} \bar{X}_2 = \frac{1}{2}: \quad \bar{\theta} = \bar{\theta}_{w(n+1)}, \quad \bar{X}_2 = -\frac{1}{2}: \quad \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2} = \bar{q}_w, \\ t = 0: \quad \bar{\theta} = \bar{\theta}_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Для численного решения (12), (13) применялся конечно-разностный метод в сочетании с пошаговым методом линеаризации. Для решения разностных систем уравнений был использован метод скалярной прогонки по координатным направлениям.

Коэффициент теплообмена α_s на твердой стенке рассчитывался с помощью специального метода, предложенного в [11], согласно которому численно-аналитическое решение уравнения теплопроводности (12) находится только для главных членов теплового потока в направлении по нормали к нагреваемой поверхности с граничным условием в виде заданной температуры поверхности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = F_0 \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2^2}, \quad 0 < \bar{X}_2 < 1; \\ \bar{X}_2 = \frac{1}{2}: \quad \bar{\theta} = \bar{\theta}_s, \quad \bar{X}_2 = -\frac{1}{2}: \quad \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2} = 0, \quad \bar{t} = 0: \quad \bar{\theta} = 1. \end{aligned} \quad (14)$$

В силу линейности задачи (14) ее решение — безразмерная температура $\bar{\theta}(\bar{X}_2, \bar{t})$ и тепловой поток $\bar{q} = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2}(\bar{X}_2, \bar{t})$ являются линейными функциями от входных данных задачи — от температуры внешней поверхности $\bar{\theta}_s$, тогда значение теплового потока $\bar{q}_s = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2}(0, 1)$ на поверхности контакта газа и конструкции среды в момент времени $\bar{t} = 1$ можно представить в виде $\bar{q}_s = g(\text{Fo})(\bar{\theta}_s - 1)$, где $g(\text{Fo})$ — некоторая функция от параметра Фурье, которую находим из формулы $g(\text{Fo}) = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}_2}(0, 1) / (\bar{\theta}_s - 1)$. Возвращаясь к размерным величинам, получаем выражение для коэффициента теплообмена в твердой конструкции:

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s g(\text{Fo})}{h}. \quad (15)$$

Для решения задачи газодинамики на одном шаге итерации по «медленному» времени применялся метод установления по «быстро-

му» времени τ с использованием модели многомерного пограничного слоя [12], благодаря которой уравнения течения идеального газа и вязкого газа также разделяются. Решение уравнений идеального газа ищется во всей области V_1 течения газового потока с граничными условиями непроницаемости на твердой стенке, затем полученное решение идеального потока на твердой стенке для плотности, касательных компонент скорости и температуры: ρ_b , $v_{b\tau} = \mathbf{v}_b \cdot \boldsymbol{\tau}$, θ_b переносится на внешнюю поверхность условного пограничного слоя, на которой формулируются следующие условия для системы уравнений (1)–(3):

$$\Sigma_b : \rho = \rho_b, \quad \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau} = v_{b\tau}, \quad \theta = \theta_b, \quad (16)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ — единичный касательный вектор в поверхности пограничного слоя. Численный метод решения задачи газодинамики (1)–(3) для идеального газа на основе схем TVD описан в работах [7, 13, 15]. Решение системы уравнений (1), (2) с условиями (5)–(8), (9) в области V_1 проводится до установления.

Численное моделирование по разработанному алгоритму осуществлялось с помощью программного комплекса Sigma, разработанного на кафедре ФН-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана [15–17].

Результаты численного моделирования. Были проведены несколько серий вариантного численного моделирования прогрева конструкций створок жалюзи ВЗР с ПОС. Изменялись следующие параметры:

температура холодного воздуха в диапазоне $\theta_e = -10 \dots -50$ °С.

скорость обтекающего потока холодного воздуха в диапазоне 5...20 м/с;

мощность электронагревателя W , приходящегося на один элемент жалюзи ВЗР, в диапазоне 100...1000 Вт.

В расчетах варьировались значения плотности теплового потока $q_w = \gamma W/S$, где γ — тепловой эквивалент передачи электрической энергии в тепловую; S — площадь нагреваемой поверхности створок жалюзи. В качестве материалов опорной стойки ВЗР была выбрана сталь со следующими характеристиками: $\rho_s = 7,8$ г/см³, $c_s = 0,8$ кДж/(кг·К), $\lambda_s = 5$ Вт/(м·К). В результате численных расчетов было получено значение коэффициента теплообмена на поверхности ВЗР: $\alpha = 0,4$ Вт/(м·К).

На рис. 3–6 показаны некоторые из полученных результатов численного моделирования параметров воздушного потока, обтекающего конструкцию жалюзи ВЗР с ПОС при температуре холодного воздуха $\theta_e = 50$ °С, скорости $v_e = 5$ м/с и плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м².

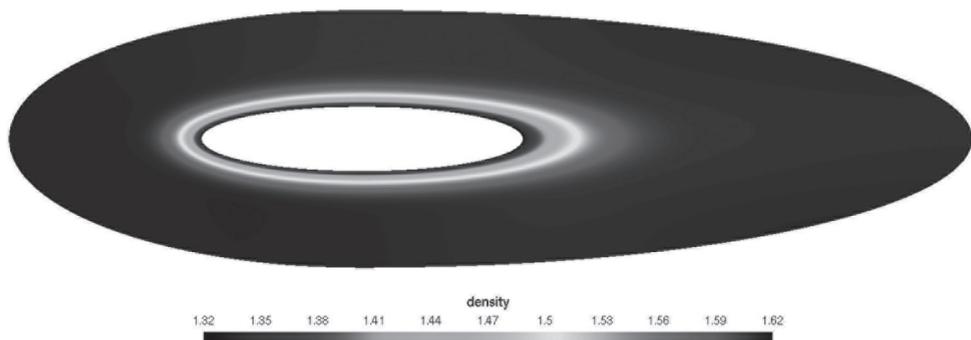


Рис. 3. Расчетное поле плотности воздушного потока, обтекающего конструкцию опорной стойки ВЗР с ПСО, при температуре холодного воздуха $\theta_e = -50$ °С, скорости 5 м/с и плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м²

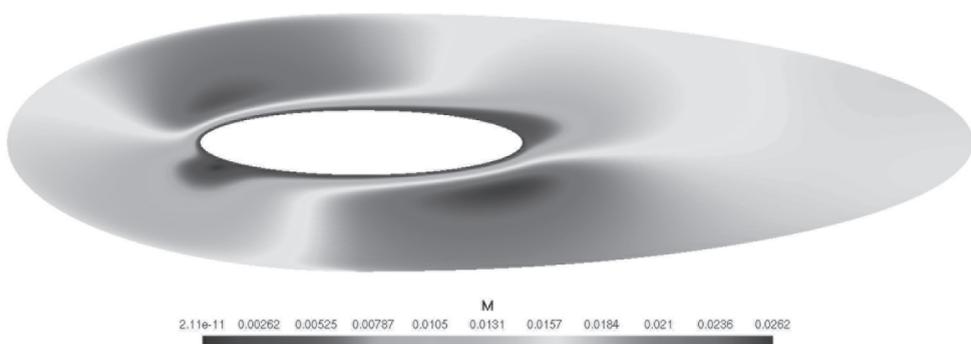


Рис. 4. Расчетное поле числа Маха воздушного потока, обтекающего конструкцию опорной стойки ВЗР с ПСО, при температуре холодного воздуха $\theta_e = -50$ °С, скорости 5 м/с, плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м²

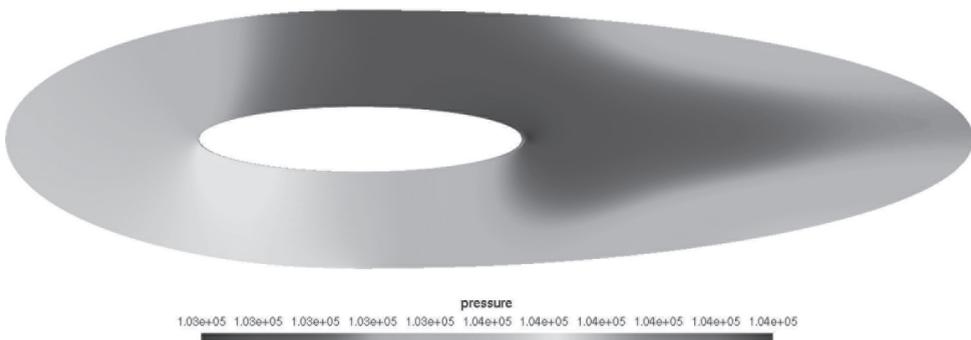


Рис. 5. Расчетное поле давления воздушного потока, обтекающего конструкцию опорной стойки ВЗР с ПСО, при температуре холодного воздуха $\theta_e = -50$ °С, скорости 5 м/с, плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м²

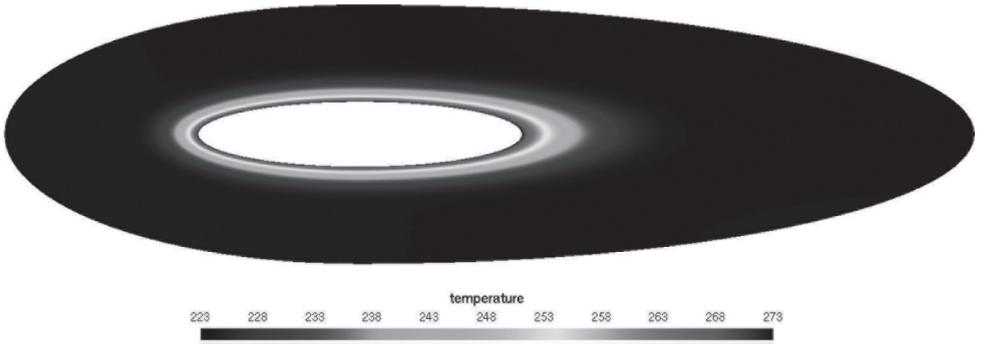


Рис. 6. Расчетное температурное поле воздушного потока, обтекающего конструкцию опорной стойки ВЗР с ПСО, при температуре холодного воздуха $\theta_e = -50$ °С, скорости 20 м/с, плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м²

На рис. 7 показан один из полученных результатов численного вариантного моделирования температурного поля в стенках конструкции опорной стойки ВЗР с ПСО. Результаты расчетов показывают, что температурное поле распределяется очень неравномерно: минимальное значение температуры достигается в передней (навстречной) части стойки, выступающей в сторону набегающего потока, а максимальное значение локализуется в задней части стойки.

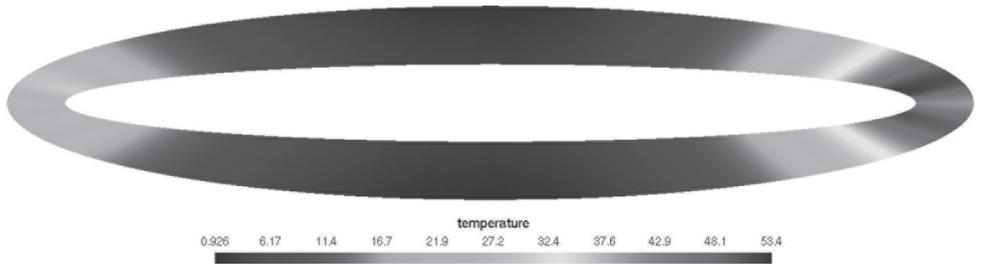


Рис. 7. Расчетное температурное поле в конструкции створки опорной стойки ВЗР с ПСО при температуре холодного воздуха $\theta_e = -10$ °С, скорости 5 м/с, плотности теплового потока обогревателя $q_w = 210$ Вт/м²

Числовые значения максимальной и минимальной температур на корпусе оболочки жалюзи при различных вариантах расчетов представлены в таблице.

При температуре воздуха $\theta_e = -50$ °С и скорости потока $v_e = 5$ м/с для обеспечения положительных значений температуры ($\theta_{w,\min} = 0,04$ °С, $\theta_{w,\max} = 97,1$ °С) на корпусе опорной стойки ВЗР необходимы значения плотности теплового потока электронагрева $q_w = 670$ Вт/м². Таким образом, установлено, что с понижением температуры окружающего воздуха, возрастает не только мощность электронагрева, необходимая для

обеспечения положительных температур на корпусе ВЗР, но и перепад температур по поверхности корпуса ВЗР.

Таблица

Значения максимальной и минимальной температур в корпусе опорной стойки ВЗР с ПСО при различных отношениях температуры и скорости потока и плотности теплового потока электронагрева

№	Температура, °С, и скорость потока, м/с	Плотность теплового потока электронагрева q_w , Вт/м ²			
		210	250	300	350
1	$\frac{-10}{5}$	$\frac{53,4}{0,9}$	$\frac{59,2}{1,5}$	$\frac{62,4}{4,6}$	$\frac{62,6}{7,8}$
	$\frac{-10}{20}$	$\frac{56,4}{1,9}$	$\frac{61,2}{3,5}$	$\frac{68,4}{5,6}$	$\frac{72,6}{8,8}$
3	$\frac{-30}{5}$	$\frac{83,2}{0,9}$	$\frac{87,6}{1,8}$	$\frac{94,2}{2,6}$	$\frac{112,2}{4,6}$
	$\frac{-30}{20}$	$\frac{89,5}{0,9}$	$\frac{86,5}{1,8}$	$\frac{93,1}{2,4}$	$\frac{107,5}{4,2}$
5	$\frac{-50}{5}$	$\frac{89,5}{0,9}$	$\frac{86,5}{1,8}$	$\frac{93,1}{2,4}$	$\frac{107,5}{4,2}$

Выводы. Разработана математическая модель тепловых процессов, проходящих в конструкциях ВЗР с ПСО в условиях воздействия холодных воздушных потоков.

Разработан алгоритм численного решения сопряженной газодинамики воздушного потока, обтекающего поверхность ВЗР, и задачи теплопроводности в конструкции самой ВЗР с учетом ее электроподогрева.

Проведены серии численных экспериментов по моделированию процессов обтекания и теплового режима ВЗР с ПСО при различных значениях параметров холодного потока и мощности электронагрева, в результате которых установлено, что с уменьшением температуры холодного воздуха от -10 до -50 °С потребная мощность электронагревателя для обогрева жалюзи и плотность теплового потока возрастает от 210 до 670 Вт/м², при этом изменение скорости ветра от 5 до 20 м/с сказывается менее существенно на потребной мощности электронагрева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (номер НИР 1.5433.2011), РФФИ (грант № 12-08-00998-а) и Министерства промышленности и торговли РФ (государственный контракт №12411.1007499.09.062).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаров Ю.В. *Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины*. Ленинград, Судостроение, 1972, 566 с.
- [2] Языков В.Н. *Теоретически основы систем кондиционирования воздуха*. Ленинград, Судостроение, 1967, 234 с.
- [3] Feher L., Thumm M. Design of Avionic Microwave De-Anti-Icing Systems. in M. Willert-Porada(ed), *Microwave devices*. Springer 792 p., ISBN: 3540432523, pp. 695–702. 2006.
- [4] Petrenko V.F., Sullivan C. *Methods and Systems for Removing Ice from Surfaces*. Patent 6,653,598 B2, US. 2003.
- [5] Bhamidipat: M. *Smart Anti-Ice Coating*. URL: <http://www.virtualacquistitionshowcase.com/document/440/briefing>
- [6] Lozowski E., Szilder K., Makkonen L. Computer simulation of marine ice accretion. *Philosophical Trans of the Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, pp. 2811–2845.
- [7] Димитриенко Ю.И., Котенев В.П., Захаров А.А. *Метод ленточных адаптивных сеток для численного моделирования в газовой динамике*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2011, 280 с.
- [8] Димитриенко Ю.И. *Механика сплошной среды. Т. 2: Универсальные законы механики и электродинамики сплошной среды*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 560 с.
- [9] Димитриенко Ю.И. *Нелинейная механика сплошной среды*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2009, 610 с.
- [10] Димитриенко Ю.И. *Механика сплошной среды. Т. 1: Тензорный анализ*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 463 с.
- [11] Dimitrienko Yu.I., Efremov G.A., Chernyavsky S.A. Optimal Designing of Erosion-Stable Heat-Shield Composite Materials. *International Journal of Applied Composite Materials*, 1997, vol. 4 (1), p. 35–52.
- [12] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Коряков М.Н. Модель трехмерного пограничного слоя и ее численный анализ // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. Спец. вып.* 2011, с. 136–150.
- [13] Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А., Сыздыков Е.К. Развитие метода ленточно-адаптивных сеток на основе схем TVD для решения задач газовой динамики. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2011, № 2, с. 87–97.
- [14] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Коряков М.Н. Моделирование газодинамических потоков в каналах сверхзвуковых воздухозаборников на основе модели трехмерного пограничного слоя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/aero/39.html>
- [15] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А. Автоматизированная система для моделирования газовых потоков методом ленточных адаптивных сеток. *Информационные технологии*, 2009, № 6, с. 12–16.
- [16] Димитриенко Ю.И., Минин В.В., Сыздыков Е.К. Моделирование внутреннего тепломассопереноса и термонапряжений в композитных оболочках при локальном нагреве. *Математическое моделирование*, 2011, т. 23, № 9, с. 14–32.
- [17] Димитриенко Ю.И., Минин В.В., Сыздыков Е.К. Численное моделирование процессов тепломассопереноса и кинетики напряжений в термодеструкти-

рующих композитных оболочках. *Вычислительные технологии*, 2012, т. 17, № 2, с. 44–60.

- [18] Димитриенко Ю.И., Минин В.В., Сыздыков Е.К. Моделирование термомеханических процессов в композитных оболочках при локальном нагреве излучением. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2011, т. 17, № 1, с. 71–91.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Чибисов В.Ю. Численное решение сопряженной задачи газодинамики и теплообмена для воздухозаборной решетки с противообледенительной системой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1116.html>

Димитриенко Юрий Иванович родился в 1962 г. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1984 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» МГТУ им. Н.Э. Баумана (НОЦ «СИМПЛЕКС»), действительный член академии инженерных наук. Автор более 250 научных работ в области вычислительной механики, газодинамики, термомеханики композитов, математического моделирования в науке о материалах. e-mail: dimit.bmstu@gmail.com

Коряков Михаил Николаевич родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 работ в области вычислительной газодинамики.

Чибисов Виктор Юрьевич родился в 1989 г., окончил МГУПБ в 2011 г. Ведущий инженер Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области теплотехнических технологий. e-mail: vitek2003@list.ru