

DOI: 10.7242/1999-6691/2012.5.2.25

УДК 519.688

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ШУМОТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОЖУХОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

П.В. Трусов¹, Д.А. Чарнцев²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия²ОАО НПО «Искра», Пермь, Россия

Рассматривается задача исследования теплового состояния шумотеплоизолирующего кожуха (КШТ), в котором располагается газотурбинная установка (ГТУ). Отмечается, что при исследовании теплового состояния стенок КШТ важную роль играет учет теплопередачи за счет радиационного излучения нагретых элементов конструкции. Предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать скорости течения воздуха внутри КШТ, а также температуру воздуха и материала, из которого изготовлены стенки КШТ, с учетом радиационного теплообмена. Разработан параллельный алгоритм для решения задачи газовой динамики на вычислительном кластере. Решена задача оптимизации разбиения расчетной области при распараллеливании расчетов. Проведены расчеты для КШТ одного из существующих газоперекачивающих агрегатов. Из полученных результатов следует, что при решении задачи твердотельной теплопроводности для стенок КШТ необходимо учитывать лучистый теплообмен. Отмечается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментально измеренных величин температуры характерных точек внешней поверхности стенок КШТ.

Ключевые слова: численное исследование, метод крупных ячеек, связанная задача, тепловое излучение, фиктивная ячейка, оптимизация разбиения расчетного пространства

NUMERICAL MODELING OF VENTILATION PROCESS AND THERMAL STATUS OF THE NOISE-HEAT PROTECTIVE HOUSING OF A GAS-TURBINE PLANT ON PARALLEL COMPUTERS

P.V. Trusov¹ and D.A. Charntsev²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia²PC SPA «Iskra», Perm, Russia

We study the thermal status of a noise-heat protective housing (NHPH), where a gas turbine plant (GTP) is located. The analysis of thermal conditions requires consideration of heat transfer caused by radiation emitted by the heated elements of the housing. In this paper, a mathematical model is proposed to calculate the rate and temperature of the air flow inside the NHPH, as well as the temperature of the NHPH wall-material, making allowance for radiation heat transfer. A parallel algorithm is designed for solving the cluster gas dynamic problem. The optimization problem is solved by applying the parallel domain decomposition method. Calculations are made for the NHPH of one of the available of gas-compressor units. The results confirm that the heat transfer caused by radiation should be taken into account in the solution of a solid-state thermal conductivity problem for NHPH walls. There is good agreement between the calculated temperatures and the temperatures measured at certain points on the external surface of NHPH walls.

Key words: numerical investigation, large particle method, coupled problem, thermal radiation, fictitious cell, optimization based domain decomposition

1. Введение

Снижение шума на территории компрессорной станции при работе газоперекачивающего агрегата (ГПА) и охлаждение газотурбинной установки (ГТУ) достигается размещением последней в шумотеплозащитном кожухе (КШТ). Кроме ГТУ под кожухом устанавливается различное электрооборудование (датчики систем газообнаружения и пожаротушения, светильники, кабели), элементы которого имеют различную температуру эксплуатации в диапазоне от +70 до +250°C.

В результате вентиляции под КШТ поддерживается приемлемый для аппаратуры температурный режим. В силу конструктивных особенностей охлаждающий воздух не может подаваться вдоль оси ГТУ и равномерно обтекать ее поверхность. При существующих схемах подачи и отвода воздуха распределение газодинамических параметров под КШТ неравномерное, возможно образование областей с малыми скоростями воздуха (до 1–2 м/с), что приводит в этих зонах к повышению температуры, негативно влияющему на работоспособность контрольно-измерительной аппаратуры. Вышесказанное обуславливает необходимость решения задачи газовой динамики с целью нахождения полей скоростей и температуры воздуха под КШТ.

Второй важной задачей является исследование теплового состояния стенок КШТ, поскольку по правилам безопасности, ограничивающим их предельную температуру на случай возможного контакта с ними обслуживающего персонала, температура не должна превышать +50°C. Кроме того, распределение температуры на внутренней поверхности стенок КШТ дает косвенную информацию о тепловом состоянии расположенного на ней оборудования. При этом температура на стенках, как и тепловое состояние

оборудования, определяется двумя факторами: температурой обдувающего воздуха и интенсивностью теплового излучения ГТУ. В связи с этим, кроме газодинамической задачи, необходимо ставить и решать связанную задачу газовой динамики и твердотельной теплопроводности с учетом теплового излучения.

Встает задача создания математической модели, которая бы уже на стадии проектирования позволяла оптимизировать конструктивные параметры системы охлаждения, а разработанный на ее основе программный комплекс давал возможность в условиях конструкторского бюро рассчитывать большое количество вариантов конструктивного исполнения систем охлаждения ГТУ в приемлемых для производства временных интервалах, проводить численное моделирование различных нестационарных режимов работы системы охлаждения ГТУ, например таких, как аварийный останов вентиляторов системы охлаждения. Поэтому становится актуальным вопрос о максимально возможном повышении скорости вычислений, чего невозможно достичь без использования распараллеливания расчетов.

В настоящей статье рассматривается математическая модель, ориентированная на решение вышеописанных задач, а также на методы повышения производительности вычислений, имеющие целью максимальное сокращение времени счета. Приведены результаты газодинамических и тепловых расчетов, подтверждаемые экспериментальными данными.

2. Постановка задачи и метод решения

На рисунке 1 схематично представлена конструкция КШТ. Вентиляция пространства внутри КШТ осуществляется с помощью атмосферного воздуха, подаваемого вентилятором. Также под кожух поступает воздух из системы охлаждения трансмиссии, соединяющей ГТУ и центробежный компрессор, и горячий воздух из ГТУ (через места утечек).

Задача исследования теплового состояния КШТ разбивается на связанные подзадачи:

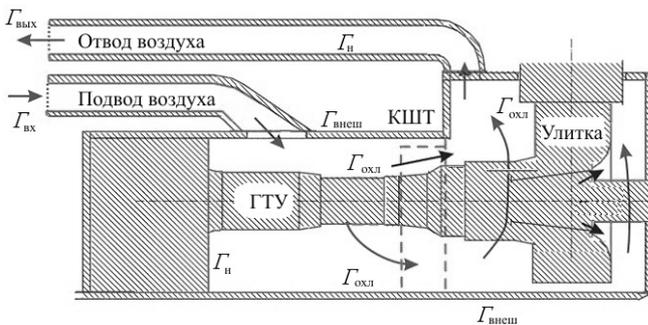


Рис. 1. Расчетная область (стрелками показан поток воздуха)

- газодинамическую (определяются поля скорости и температуры охлаждающего воздуха под КШТ);

- твердотельной теплопроводности (находятся поля температуры в твердых телах, активно участвующих в теплообмене, таких как стенки КШТ);

- вычисления тепловых потоков на границах расчетных областей вышеприведенных подзадач с учетом теплового излучения.

Для описания газодинамических процессов используются гипотезы об идеальном сжимаемом однокомпонентном теплопроводном газе. В этом случае движение газа описывается системой уравнений движения Эйлера [1]:

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_z \mathbf{V}) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_z \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho_z \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla P = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_z E) + \nabla \cdot (\rho_z E \mathbf{V}) + \nabla \cdot (P \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

$$P = P(\rho_z, e), \quad E = (\mathbf{V} \cdot \mathbf{V})/2 + e, \quad e = c_z T,$$

где ρ_z — плотность газа; \mathbf{V} — вектор скорости; P — давление; E и e — удельные полная и внутренняя энергии; c_z — теплоемкость газа (при постоянном давлении); T — температура; число Рейнольдса для рассматриваемых процессов течения составляет $(6 \dots 10) \cdot 10^5$; в качестве уравнения состояния взято уравнение Клапейрона–Менделеева.

Задача твердотельной теплопроводности в предположении изотропии и постоянства теплофизических характеристик материала при отсутствии внутренних источников тепла сводится к решению уравнения теплопроводности [2]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_m \Delta T, \quad (2)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа; $a_m = \lambda_m / (c_m \rho_m)$ — коэффициент температуропроводности,

λ_m — коэффициент теплопроводности, c_m , ρ_m — теплоемкость и плотность материала.

Для решения газодинамической задачи граница расчетной области Γ (см. Рис. 1) разделена на четыре типа. На входной части $\Gamma_{вх}$ считаются известными параметры входящего потока:

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{V}_{\text{ex}}, \quad \rho(x) = \rho_{z_{\text{ex}}}, \quad T(x) = T_{\text{ex}}, \quad x \in \Gamma_{\text{ex}} \quad (3)$$

На выходной части $\Gamma_{\text{вых}}$ задаются следующие условия:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial \mathbf{n}} = \delta(P_{\text{атм}} - P(x)), \quad \frac{\partial \rho_z(x)}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \frac{\partial T(x)}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{V}(x)}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad x \in \Gamma_{\text{вых}}, \quad (4)$$

где δ — числовой параметр, который отвечает за скорость стремления давления воздуха на выходе к атмосферному. Значение параметра должно, с одной стороны, сохранять устойчивость решения вблизи выходной границы, с другой стороны, обеспечивать достаточную скорость стремления давления на выходе к атмосферному. При достижении стационарного режима расходы воздуха на входе и на выходе из расчетной области равны.

Граница Γ_n предполагается непроницаемой для воздуха, и тепловым потоком на ней можно пренебречь (это твердые поверхности, не принимающие активного участия в процессах теплообмена):

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \frac{\partial \rho_z}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (5)$$

На границе $\Gamma_{\text{охл}}$ (охлаждаемые поверхности двигателя и стенок КШТ) задаются непроницаемость для потока воздуха и граничные условия 3-го рода в задаче теплопроводности:

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \frac{\partial \rho_z}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \lambda_z \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_i (T_s - T_G), \quad x \in \Gamma_{\text{охл}i}, \quad (6)$$

где α_i — коэффициенты конвективной теплоотдачи разных участков охлаждаемых поверхностей; λ_z — коэффициент теплопроводности воздуха; T_G — температура воздуха, T_s — температуры поверхностей соответствующих частей конструкции.

Граница расчетной области твердотельной задачи разбивается на участки $\Gamma_{\text{тохл}i}$, $i = \overline{1,4}$, которые соответствуют вертикальным, горизонтальным, а также внешним и внутренним поверхностям стенок КШТ. Такое разбиение обусловлено тем, что каждый из указанных участков имеет свой коэффициент теплоотдачи α_i . На теплообмен вертикальных и горизонтальных поверхностей по-разному влияет гравитационная конвекция, а внутренние и внешние поверхности КШТ отличаются тем, что внутри кожуха присутствует искусственно созданный поток охлаждающего воздуха, а с внешней стороны такой поток отсутствует. На вышеуказанных частях границы расчетной области при решении твердотельной задачи имеют место граничные условия следующего вида:

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_i (T_G - T_s) + q_n, \quad x \in \Gamma_{\text{тохл}i},$$

где q_n — плотность лучистого теплового потока; \mathbf{n} — единичная внешняя нормаль; $\partial T / \partial n = \mathbf{n} \cdot \nabla T$. Коэффициенты теплоотдачи α_i для этих границ рассчитываются согласно [2]. Методика расчета плотности лучистого теплообмена q_n будет описана ниже.

Постановка чисто газодинамической задачи содержит соотношения (1), (3)–(6) с тем отличием, что под границей $\Gamma_{\text{охл}}$ понимается только поверхность ГТУ; вся поверхность стенок КШТ относится к границе Γ_n .

3. Метод решения

Основным способом решения нелинейных связанных краевых задач, включающих системы дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии, теплопроводности, состояния и прочих с соответствующими начальными и граничными условиями, является использование численных методов. В ряде исследований [3–5] для реализации задачи движения сплошной среды прибегают к методам конечных и граничных элементов. Большое внимание при решении подобных задач уделяется конечно-разностным методам [6–9], сильной стороной которых является относительно малая потребность в вычислительных ресурсах. К еще большему повышению эффективности конечно-разностных алгоритмов приводит обращение к схемам факторизации эволюционных дифференциальных уравнений [10, 11].

К таким методам относится метод крупных частиц Ю.М. Давыдова [11–13], который опирается на идею специального расщепления системы дифференциальных уравнений газовой динамики по физическим процессам.

В задаче вентиляции пространства под КШТ имеет место течение газа при сложной геометрии границ расчетной трехмерной области, взаимодействие струй с поперечными потоками, истечение газа из отверстий и каналов. Для решения подобных задач метод крупных частиц является достаточно эффективным. Он позволяет проводить исследования вихревых структур с учетом отрывных явлений, струйных течений [14]. В качестве расчетной, как правило, берется однородная ортогональная сетка. Метод не требует её сгущения в целях повышения устойчивости, как это бывает с другими методами, использующими нерегулярную сетку (например, метод контрольных объемов). Связанные с его применением вопросы устойчивости и порядка аппроксимации подробно рассмотрены в монографиях [1, 11, 12].

В рассматриваемой задаче газовой динамики все наиболее важные участки расчетной области обладают примерно одинаковым характерным размером, сгущение сетки не требуется, поэтому метод крупных частиц, как метод реализации решения, наилучшим образом отвечает цели настоящей работы. Количество и размер ячеек устанавливались с помощью численных экспериментов при последовательном уменьшении размеров ячеек (до достижения малого отличия результатов по скоростям перемещений и температурам). В итоге размер ребер расчетных ячеек был принят равным 50 мм, количество расчетных ячеек для разных конструкций кожухов варьировалось в диапазоне 350...600 тысяч.

Расчетная область задачи твердотельной теплопроводности имеет достаточно простую форму, и ее целесообразно дискретизировать при помощи конечно-разностного метода с однородной ортогональной сеткой: в таком случае численная реализация является наиболее простой. Методы построения и границы применимости конечно-разностных схем рассмотрены в работах [15–18], вопросы приложения к решению конкретных прикладных проблем обсуждаются в работах [19–21]. Аппроксимация трехмерного дифференциального уравнения (2) осуществлялась на основе 8-точечного шаблона. Схема является явной и имеет первый порядок аппроксимации по времени и пространству. Размер ребер расчетных ячеек задачи твердотельной теплопроводности также находился из численных экспериментов и выбран равным 2,5 мм.

4. Распараллеливание на кластере

Для повышения скорости вычислений разработан алгоритм реализации метода крупных частиц, ориентированный на параллельные вычисления на кластере. Использование конечно-разностных явных схем и однородной ортогональной сетки делает процедуру распараллеливания метода крупных частиц довольно простой. Расчетная область делится секущими плоскостями на подобласти, и вычисления в каждой из них передаются отдельному процессору кластера. Между любой подобластью и подобластями,

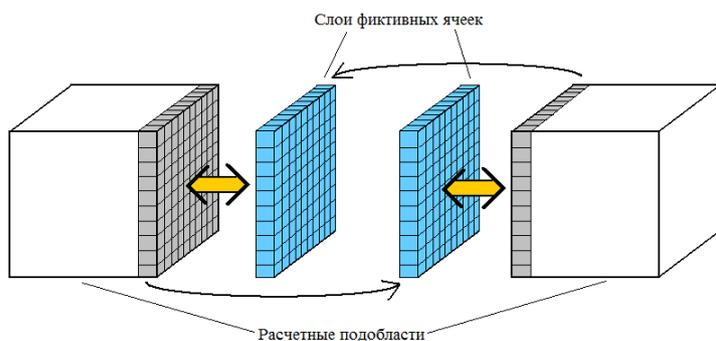


Рис. 2. Введение фиктивных слоев при распараллеливании

непосредственно к ней прилегающими, организуется обмен данными в пограничных слоях ячеек. Основная особенность расчетного алгоритма программы, изначально проектировавшейся с перспективой параллелизации, заключается в отсутствии трехмерного массива расчетных ячеек. Каждая расчетная ячейка имеет прямую ссылку на своих соседей, что помогает, в частности, разрешить конфликт, возникающий при определении значений компонент скорости в фиктивной ячейке. Например, в фиктивных ячейках, на границе с которыми заданы условия прилипания, векторы скорости равны по величине и противоположны по направлению векторам скорости в расчетных ячейках. При этом возможна ситуация, когда одна и та же фиктивная ячейка имеет разные векторы скорости для различных расчетных ячеек. Эту несогласованность удастся устранить введением дополнительной фиктивной ячейки, появление которой никак не сказывается на основном расчетном алгоритме.

По такому же принципу происходит деление расчетной области при параллелизации. Если рассмотреть две подобласти, которые граничат друг с другом, то ячейки пограничного слоя одной подобласти имеют ссылки на ячейки в пограничном слое соседней подобласти. При распараллеливании вводятся фиктивные слои ячеек, с которыми устанавливается связь пограничных ячеек. Во время между шагами интегрирования происходит обмен данными по схеме, приведенной на рисунке 2. Таким образом, механизмы обмена данными не изменяют основной расчетный алгоритм.

4.1. Распараллеливание на многоядерном процессоре

Разработан алгоритм реализации метода крупных частиц применительно к параллельным вычислениям на многоядерном процессоре. Отличие его от кластерного варианта заключается в отсутствии специально организуемых процедур обмена данными между подобластями; соответственно не вводятся и необходимые для этого фиктивные слои ячеек. Здесь число подобластей, на которые делится расчетная область, равняется числу ядер процессора. Деление осуществляется оптимальным с точки зрения равномерного распределения расчетных ячеек образом. В каждой подобласти вычислительные функции отдаются отдельному ядру процессора. Так как все ядра процессора имеют общую память, то расчетные ячейки, находящиеся в одной расчетной подобласти, имеют прямые ссылки на расчетные ячейки из других подобластей, как и в алгоритме без параллелизации.

4.2. Оптимизация разбиения на подобласти при распараллеливании

Расчетная область краевой задачи газовой динамики вписывается в параллелепипед, который в дальнейшем будет называться расчетным пространством. Расчетное пространство разделяется на кубические ячейки аппроксимирующей сетки. Общее количество ячеек $N_{\text{общ}}$ дискретной области вычисляется по формуле:

$$N_{\text{общ}} = N_x \cdot N_y \cdot N_z, \quad (7)$$

где N_x, N_y, N_z — количество ячеек по сторонам расчетного параллелепипеда, соответственно, в направлении осей X, Y, Z . Ячейки, согласно терминологии метода крупных частиц, делятся на три типа: расчетные (аппроксимируют пространство, занятое движущимся газом), фиктивные (аппроксимируют границы расчетной области краевой газодинамической задачи) и пустые (соответствуют тем областям расчетного пространства, где отсутствуют течение газа и твердые границы). При равномерном разбиении ячейки разных типов, вследствие геометрии расчетного пространства, неравномерно распределяются по подобластям (в некоторых подобластях число пустых ячеек может намного превышать число расчетных). Чем больше в подобласти расчетных ячеек, тем меньшей становится скорость расчета в этой подобласти.

Так как скорость параллельных вычислений определяется самой медленной скоростью вычислений на узле кластера, то разбиение следует осуществлять таким образом, чтобы величина самого большого расчетного объема (то есть подобласти с наибольшим количеством расчетных ячеек) была минимальной. Для этого требуется решение задачи оптимизации разбиения расчетного пространства.

На рисунке 3 представлена схема разбиения расчетного пространства на подобласти. Здесь x_1, \dots, x_n ($y_1, \dots, y_m; z_1, \dots, z_k$) — целочисленные координаты секущих плоскостей $\{Y; Z\}$, перпендикулярных оси X . Под целочисленными координатами понимаются номера ячеек вдоль сторон параллелепипеда, которые изменяются в следующих интервалах: $x_i \in [0, N_x]$, $y_i \in [0, N_y]$, $z_i \in [0, N_z]$. Критерием оптимизации выступает максимальное количество расчетных ячеек в расчетной подобласти J , которое является функцией координат $(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_k)$ секущих плоскостей: $J = \max_i (N_{\text{расч } i}) = f(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_k)$, где $N_{\text{расч } i}$ — число расчетных ячеек в i -й расчетной подобласти.

Задача оптимизации имеет вид: $J \rightarrow \min$, при этом $1 < x_1 < x_2 < \dots < x_n < N_x$, $1 < y_1 < y_2 < \dots < y_m < N_y$, $1 < z_1 < z_2 < \dots < z_k < N_z$, $x_i, y_i, z_i \in N$, где N — множество натуральных чисел. Ее решение позволяет повысить скорость параллельных расчетов в реальных расчетных областях примерно в два раза относительно решения исходной задачи без оптимизации.

5. Вычисление лучистых тепловых потоков

При изучении процесса вентиляции и теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок отдельной задачей является нахождение лучистых тепловых потоков. Для этого все излучающие тепло поверхности разбиваются на элементарные излучающие плоские поверхности, которые соответствуют граням фиктивных ячеек, аппроксимирующих твердые границы

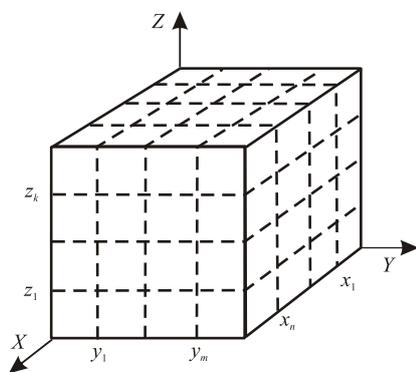


Рис. 3. Схема разбиения расчетной области

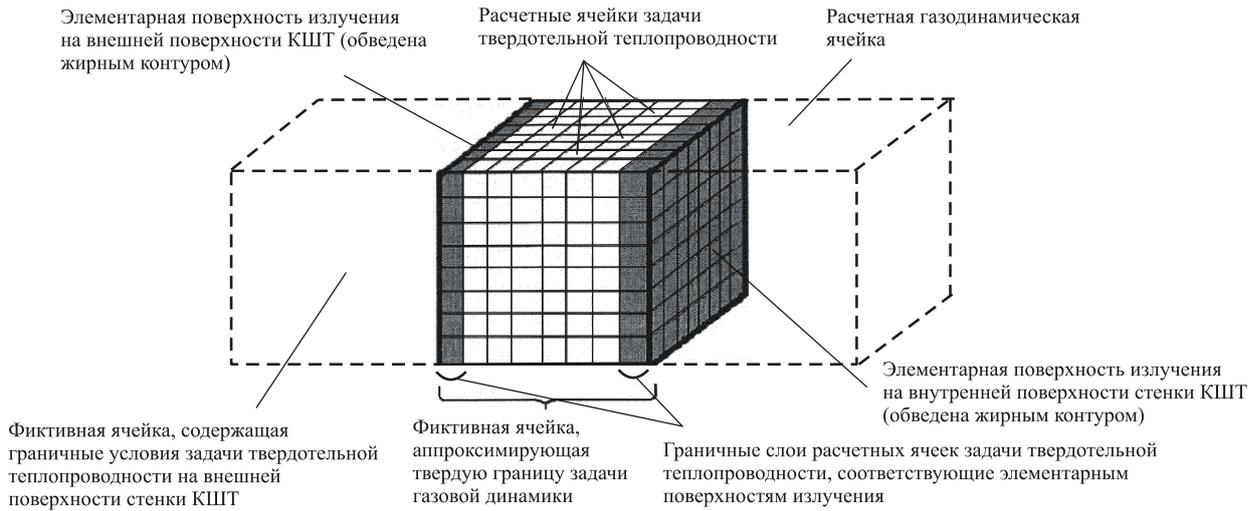


Рис. 4. Схема определения элементарных поверхностей излучения и аппроксимация границы в задаче твердотельной теплопроводности

в газодинамической задаче (Рис. 4). Рассматривается фиктивная ячейка охлаждаемой твердой границы задачи газовой динамики, для вычисления температуры на которой решается задача твердотельной теплопроводности. Такая граница соответствует поверхностям стенок КШТ. Фиктивная газодинамическая ячейка разбивается на более мелкие расчетные ячейки задачи твердотельной теплопроводности. В случае, когда фиктивная ячейка твердой границы газодинамической задачи аппроксимирует поверхность ГТУ, для которой задача твердотельной теплопроводности не решается, элементарная поверхность излучения определяется подобным образом (Рис. 4). Однако в этом случае нет необходимости в ее разбиении на расчетные твердотельные ячейки.

Для каждой i -й элементарной поверхности излучения вычисляется соответствующая плотность лучистого теплового потока $q_{\lambda i}$. На границах, принадлежащих внешним поверхностям стенок КШТ, величина $q_{\lambda i}$ рассчитывается по формуле: $q_{\lambda i} = c_0 A_i A_{\text{внеш}} \left((T_{\text{внеш}}/100)^4 - (T_i/100)^4 \right)$, где c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; A_i — коэффициент поглощения i -й поверхности; $A_{\text{внеш}}$ — средний коэффициент поглощения окружающих кожух тел; $T_{\text{внеш}}$ — температура окружающих кожух тел; T_i — температура i -й поверхности. Температура i -й поверхности определяется как средняя величина температур расчетных ячеек задачи твердотельной теплопроводности, которые лежат в граничном слое, соответствующем поверхности излучения (Рис. 4). Предполагается, что температура внешних тел равняется температуре внешнего воздушного пространства. Равенство температур внешних тел исключает необходимость учета их взаимного расположения. Знак теплового потока положителен для входящего потока и отрицателен для потока испускаемого.

В расчетах принимались следующие значения теплофизических характеристик для стенок КШТ: удельная теплоемкость $c_m = 1000$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda_m = 0,15$ Вт/(м·К), плотность $\rho_m = 40$ кг/м³, коэффициент поглощения $A = 0,7$. Коэффициент излучения ГТУ составлял 0,3.

На границах, соответствующих внутренним поверхностям стенок КШТ, величина $q_{\lambda i}$ рассчитывается по следующей формуле: $q_{\lambda i} = c_0 (A_i/F_i) \sum_{j=1}^M A_j C_{ij} \left((T_j/100)^4 - (T_i/100)^4 \right)$, где F_i — площадь i -й поверхности;

M — количество поверхностей, которые осуществляют тепловое излучение на i -ю поверхность. Компоненты матрицы C_{ij} , в общем случае, вычисляются с помощью метода многократных отражений, описанного в работе [2]; в данной работе используется формула:

$$C_{ij} = H_{ij} + \sum_k H_{ik} (1 - A_k) H_{kj} + \sum_l \sum_k H_{il} (1 - A_l) H_{lk} (1 - A_k) H_{kj} + \sum_n \sum_l \sum_k H_{in} (1 - A_n) H_{nl} (1 - A_l) H_{lk} (1 - A_k) H_{kj} + \dots, \quad (8)$$

где H_{ij} — средние взаимные коэффициенты излучения, которые показывают, какая часть энергии с i -й поверхности попадает на j -ю с учетом площадей i -й и j -й поверхностей. Формула (8) представляет собой бесконечную сумму элементов убывающей последовательности, каждое последующее слагаемое которой вносит все меньший вклад. При проведении расчетов эту сумму необходимо оборвать на определенном слагаемом. Дополнительное исследование того, в каком месте допустимо закончить

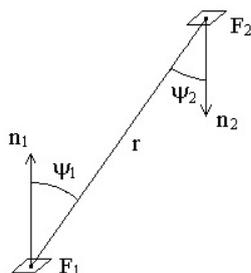


Рис. 5. Взаимное излучение двух поверхностей расчетной области

суммирование, приведено в работе [18]. Его результаты показали, что для расчетов теплового состояния стенок КШТ с приемлемой степенью точности можно принять приближение $C_{ij} = H_{ij}$.

На рисунке 5 изображена схема, используемая при вычислении коэффициентов H_{ij} для элементарных плоских поверхностей F_i . В соответствии с законом косинусов Ламберта, устанавливающим связь между полной и угловой плотностью излучения энергии [2], значение коэффициента взаимного излучения $H_{1,2}$ вычисляется согласно

соотношению:
$$H_{1,2} = \int_{F_1} \left[\int_{F_2} \frac{\cos \psi_1 \cos \psi_2}{\pi r^2} dF_2 \right] dF_1$$
, где r — расстояние между центрами элементарных плоских поверхностей.

6. Расчетная процедура

Задача газовой динамики ставится и решается как нестационарная; выход на стационарный режим (при штатной работе системы охлаждения ГТУ) осуществляется методом установления. Шаг интегрирования по времени выбирался в результате численных экспериментов и составляет $\Delta t = 1,6 \cdot 10^{-6}$ с. В случае необходимости проведения расчета теплового состояния стенок КШТ после решения газодинамической задачи подключается задача твердотельной теплопроводности с учетом лучистого теплообмена.

В отличие от газодинамической задачи, где стационарный режим достигается в течение 1,5–2 с, поле температур при твердотельной теплопроводности приходит в стационарное состояние в течение нескольких минут. Поэтому здесь шаг интегрирования по времени должен быть существенно большим, и он принимается равным $\Delta t = 1$ с. Вследствие того, что шаги интегрирования задач газовой динамики и твердотельной теплопроводности существенно различаются между собой, для решения совместной задачи необходима итерационная процедура, реализующая поочередное интегрирование этих двух задач с учетом их взаимного влияния. Такая процедура разработана, и каждая итерация включает три последовательных шага:

- 1-й шаг: решение задачи твердотельной теплопроводности с учетом радиационного излучения, в результате которого рассчитывается новое распределение температуры на твердотельных поверхностях;
- 2-й шаг: решение задачи газовой динамики с использованием найденных на 1-м шаге температур поверхностей;
- 3-й шаг: определение тепловых потоков между твердотельными поверхностями и воздухом по известной с 1-го шага температуре поверхностей и температуре обтекающего их воздуха, вычисленной на 2-м шаге.

На 1-м шаге следующей итерации снова проводится интегрирование задачи твердотельной теплопроводности с учетом радиационного излучения и установленных на 3-м шаге предыдущей итерации тепловых потоков между твердотельными поверхностями и воздухом.

7. Результаты расчета

Ниже приведены результаты расчетов для системы охлаждения ГТУ 25-мегаваттного агрегата, на основании которых можно оценить необходимость решения задачи в связанной постановке. На рисунке 6 представлена схема расчетной области конструкции КШТ 25-мегаваттного агрегата. Результаты расчетов (поля скоростей и температур охлаждающего воздуха), а также распределения температур на поверхностях стенок КШТ показаны на рисунках 7, 8. Температуры для удобства даются в градусах Цельсия.

Из результатов решения газодинамической задачи виден недостаток существующей схемы подачи охлаждающего воздуха: под ГТУ ниже площадки обслуживания образуются застойные зоны и зона возвратного течения (Рис. 7), вследствие чего температура воздуха под площадкой обслуживания достигает $+65^\circ\text{C}$ (Рис. 8, а).

Одним из самых интересных результатов решения связанной задачи твердотельной теплопроводности с учетом лучистого теплообмена является обнаружение области на потолке вблизи коллектора для отвода горячих газов, где создается зона, потенциально опасная для размещения датчиковой аппаратуры (Рис. 8, з). Температура внутренней поверхности верхней стенки КШТ достигает $+80^\circ\text{C}$. Следует отметить, что конструктивное исполнение изначально как раз и предполагало размещение датчиков в этой зоне. Эксплуатация агрегатов со сходной конструкцией элементов ГТУ показала, что датчиковая аппаратура в вышеуказанной зоне была подвержена недопустимо высокому тепловому воздействию. Из рисунка 8, а видно, что решение чисто газодинамической задачи не могло выявить этой опасной области, поскольку температура охлаждающего воздуха в этой зоне не достигает $+60^\circ\text{C}$.

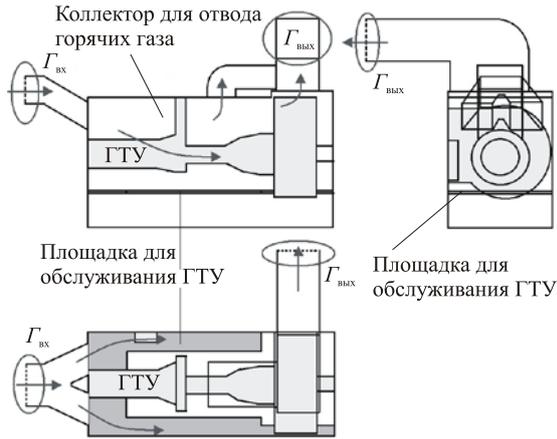


Рис. 6. Схема расчетной области для КШТ 25-мегаваттного агрегата

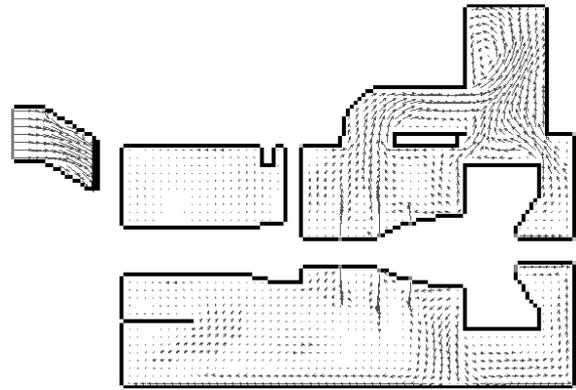


Рис. 7. Проекция векторов скоростей газового потока на вертикальное сечение, проходящее через ось ГТУ

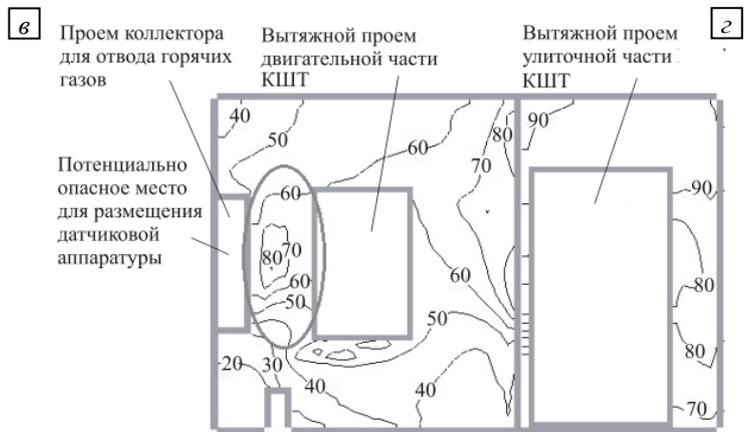
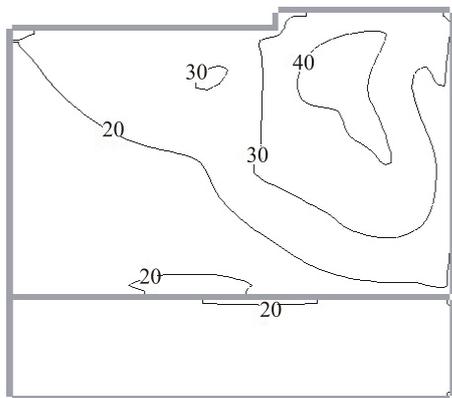
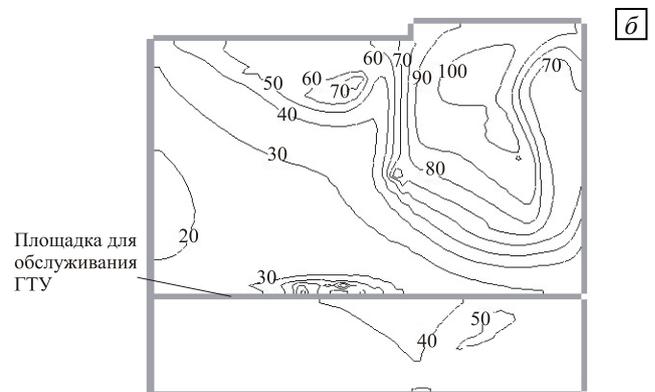
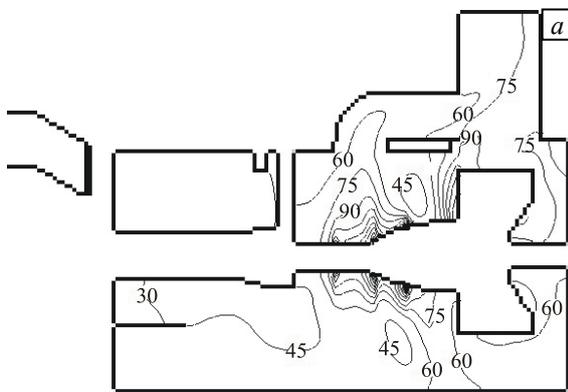


Рис. 8. Изолинии поля температуры воздуха (°C) в вертикальном сечении, проходящем через ось ГТУ (а) и распределение температуры (°C) на поверхностях КШТ: на внутренней (б) и внешней (в) сторонах боковой стенки, на внутренней поверхности верхней стенки (з)

Проведено сравнение результатов расчетов и экспериментальных измерений для 16-мегаваттного агрегата. С использованием тепловизора получены данные о температуре наружной поверхности стенки КШТ; в частности, в области улитки на высоте, примерно равной высоте, на которой находится ось ГТУ. Экспериментально определенная температура составила 33–40°C, расчетная — 30–39°C (Рис. 9). Полученное соответствие расчетных и экспериментальных данных можно признать удовлетворительным.

Для 12-мегаваттного КШТ агрегата проведена тепловизионная съемка поверхности КШТ. Боковые стенки КШТ содержат двери, которые, даже будучи в закрытом положении, не обеспечивают полной герметичности. В щели дверных проемов из-под КШТ поступает воздух, температуру которого и зафиксировал тепловизор. На рисунке 9 показаны области, в которых измерялась температура поступающего из КШТ воздуха. В таблице 1 приведены измеренные и расчетные значения температуры воздуха в указанных областях.

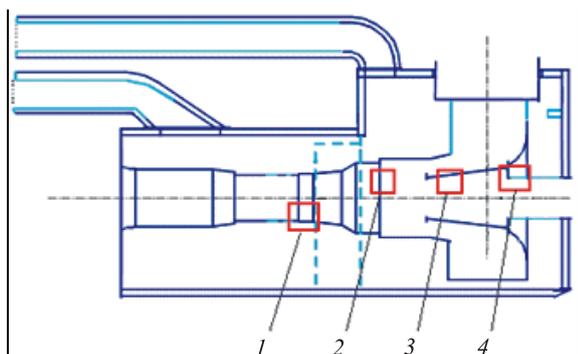


Рис. 9. Области измерения температуры воздуха, поступающего из КШТ 12-мегаваттного агрегата

Таблица 1. Расчетные и экспериментально измеренные значения температуры для КШТ 12-мегаваттного агрегата

№ области	Измеренные значения температуры, °С	Расчетные значения температуры, °С
1	35	40
2	76	82
3	82	91
4	78	90

Дополнительные исследования показали, что распределение температуры на поверхностях стенок КШТ без учета теплового излучения существенно отличается от распределения, полученного с его учетом. В частности, при расчете кожухов для агрегатов мощностью 16 МВт снижение максимальной температуры в случае пренебрежения тепловым излучением составило 20°С, максимальное снижение составило 64°С. Таким образом, при исследовании теплового состояния стенок КШТ необходимо учитывать тепловое излучение.

Литература

1. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
3. Коннор Дж., Бреббия К. Метод конечных элементов в механике жидкости. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
5. Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
6. Давыдов Ю.М. Дифференциальные приближения и представления разностных схем. – М.: МФТИ, 1981. – 131 с.
7. Пирумов У.Г. Обратная задача теории сопла. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
8. Липанов А.М., Бобрышев В.П., Алиев А.В., Спиридонов Ф.Ф., Лисица В.Д. Численный эксперимент в теории РДТТ / Под ред. А.М. Липанова. – Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. – 302 с.
9. Тарунин Е.Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1990. – 228 с.
10. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с.
11. Кучер Н.А. Некоторые замечания о схемах расщепления для уравнений газовой динамики, используемых в методе «крупных частиц» // ЖВТ. – 2006. – Т. 11, № S1. – С. 94-108.
12. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
13. Давыдов Ю.М., Давыдова И.М., Егоров М.Ю. Совершенствование и оптимизация авиационных и ракетных двигателей с учетом нелинейных нестационарных газодинамических эффектов. – М.: НАПН РФ, 2002. – 303 с.
14. Давыдов Ю.М. Численное исследование течения со струями, направленными навстречу потоку // Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского. – 1971. – Вып. 1301. – С. 70-82.
15. Самарский А.А. Введение в численные методы. – С-Пб.: Лань, 2009. – 288 с.
16. Ворожцов Е.В. Разностные методы решения задач механики сплошных сред: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 86 с.
17. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. Введение в теорию. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
18. Трусов П.В., Чарнец Д.А. Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки // Вестник СамГУ. – 2010. – Вып. 78, № 4. – С. 117-126.
19. Гакашев А.И., Тарунин Е.Л. Интенсивность тепловой конвекции в ульях // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2008. – Т. 1, № 2. – С. 16-26.
20. Любимова О.Н., Пестов К.Н., Гридасова Е.А. Численное решение задачи о проплавлении металлического слоя при сварке плавлением стекла и металла // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 63-72.
21. Багмутов В.П., Захаров И.Н. Моделирование тепловых процессов при поверхностной обработке неоднородных металлических тел высокотемпературным движущимся импульсным источником // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 5-16.

Поступила в редакцию 01.09.11; опубликована в электронном виде 30.06.12

Сведения об авторах

Трусов Петр Валентинович, дфмн, проф., зав.каф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; E-mail: trpv@matmod.pstu.ac.ru

Чарнец Дмитрий Анатольевич, вед. констр., ОАО НПО «Искра», 614038, Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28; E-mail: cdahome@mail.ru