

УДК 533

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА
В ОБЛАСТИ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ**

Численное моделирование высокоскоростного течения газа в области с движущимися границами характеризуется большими требованиями к вычислительным ресурсам при численном моделировании. Сложность процесса обуславливается минимальным необходимым значением временного шага. Получено численное решение нестационарной задачи течения сверхзвукового газового потока. Использован подход, заключающийся в замене общего решения на последовательность решений на отдельных временных шагах. Каждое из этих решений представляет собой нестационарную задачу теплопроводности с неподвижными стенками. Численное решение получено в пакете ANSYS CFX с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности. Для усреднения результатов решения в каждой точке на движущихся границах твердого тела использован прикладной пакет Matlab.

Ключевые слова: ANSYS CFX, Matlab, теплопроводность, газодинамика, уравнения Навье–Стокса.

O.Iu. Smetannikov, G.V. Il'inykh

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

**NUMERICAL SIMULATION
OF HIGH-SPEED GAS FLOW IN THE REGION
WITH MOVING BOUNDARIES**

Numerical simulation of high-speed gas flow in a region with moving boundaries characterized by large computational requirements in numerical simulations. The complexity of the process due to the minimum necessary value of the time step. Obtained numerical solution of a nonstationary problem of the flow of supersonic gas flow. The approach used, consisting in replacing the overall decision on the sequence of decisions at different time steps. Each of these solutions is a non-stationary task of thermal conductivity with fixed walls. Numerical solution of ANSYS CFX using the $k-\epsilon$ turbulence model. For averaging the results of the solution at each point on the moving boundary of the solid body used the Matlab application package.

Keywords: ANSYS CFX, Matlab, thermal conduction, aerodynamics, Navier–Stokes equations.

В задачах о натекании сверхзвукового газового потока на твердое тело может возникнуть неустойчивое течение. Данный факт, а также нелинейность, в общем случае таких задач приводят к трудностям аналитического исследования, поэтому для нахождения неустойчивого потока наиболее актуальными способами являются численные методы, в том числе метод крупных частиц [1] с эйлерово–лагранжевым подходом, включающим неподвижную расчетную сетку для области решения и совокупность крупных частиц для твердого тела. Подходы, связанные с деформацией расчетной сетки в процессе решения, рассмотрены в [2, 3]. Использование технологии накладываемых сеток описано в [4]. Другой подход, реализованный в пакете ANSYS CFX, исключает твердое тело из расчетной области, при этом движение тела подразумевает перестроение сетки с интерполяцией параметров на новую область решения [5]. В данной работе этот подход применен к исследованию высокотемпературного сверхзвукового течения с заменой процедуры перестроения сетки на решение ряда нестационарных задач в различные моменты времени.

Расчетная схема задачи представлена на рис. 1. При вылете снаряда из стеклопластиковой трубы специального назначения газовая струя, исходящая из снаряда, имеет высокую температуру, результатом воздействия которой на трубу может быть повреждение последней. Возможность многократного использования напрямую зависит от степени повреждения трубы, которая заключается в глубине деструкции ее основного материала под воздействием потока разогретого газа. На первом этапе решалась нестационарная задача газодинамики, при этом непрерывное нестационарное решение с подвижной стенкой было заменено аналогом в виде ряда решений для различных положений снаряда. Корректность данной замены обусловлена высокой частотой колебаний неустановившейся струи по сравнению со скоростью движения снаряда. Нестабильность исходящей струи привела к необходимости получения для каждого положения снаряда нестационарного решения с неподвижной стенкой и его дальнейшего усреднения. Неустановившееся решение вызвано в большей степени характером сверхзвукового течения с большими значениями числа Маха и конфигурацией модели, которая включает преграду в виде трубы [6]. При этом поведение газовой струи существенно зависит от взаимного расположения трубы и снаряда, и в некоторые моменты времени до его вылета течение стабильно.

На рис. 1 ось симметрии совпадает с осью x . На выходе из сопла (Γ_1) заданы равномерно распределенные по сечению скорость, давление и температура: $U_x = 2000$ м/с, $P = 30$ атм, $T = 3688$ К. На границе Γ_2 заданы скорость и температура окружающего воздуха: $U_x = 3$ м/с, $T = 293$ К. На выходе (Γ_3) приложено нулевое избыточное давление.

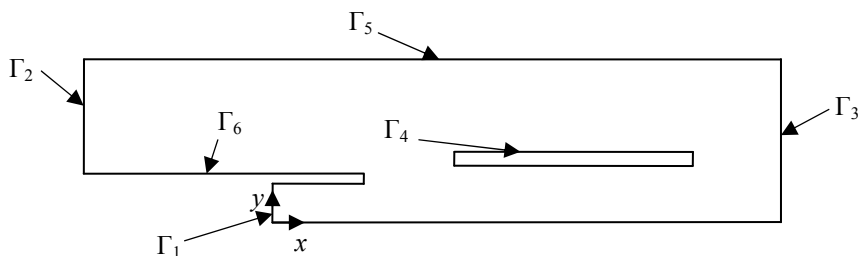


Рис. 1. Расчетная схема задачи

На внешней границе (Γ_5) заданы открытые граничные условия с нулевым давлением и температурой окружающей среды, равной 293 К. Стенки трубы и корпуса снаряда (Γ_4 , Γ_6) – адиабатические, с полным прилипанием. Для реализации задачи в ANSYS CFX расчетная область представлена в виде сектора с двумя плоскостями симметрии.

Время вылета снаряда – 0,13 с. Ускорение за это время изменяется линейно. Закон движения снаряда:

$$S = \frac{kt^3}{6} + \frac{a_0 t^2}{2}, \quad (1)$$

где k , a_0 – константы.

Общий алгоритм исследования включает:

- 1) создание ряда сеток в пакете ANSYS Mechanical APDL, соответствующих различным положениям снаряда;
- 2) решение нестационарной задачи газодинамики для набора выбранных положений в пакете ANSYS CFX и экспорт результатов в виде значений температуры на границах трубы;
- 3) импорт значений температуры, полученных в п. 2, их усреднение в пакете Matlab и последующий экспорт усредненных значений;
- 4) решение нестационарной задачи теплопроводности, представляющее собой последовательный ряд решений стационарных задач для

моментов времени, соответствующих выбранным положениям снаряда. Для задания граничных условий третьего рода использованы импортированные усредненные значения температуры на границах трубы.

В рамках текущей работы реализованы первые три пункта алгоритма.

Краевая задача МЖГ с k - ε -моделью турбулентности включает [7]:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U}) = 0; \quad (2)$$

- уравнения движения:

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U} \otimes \bar{U}) = -\nabla\left(\mu_{\text{eff}}\left(\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T\right)\right), \quad (3)$$

$$P' = P + \frac{2}{3}\rho k,$$

$$\frac{\partial(\rho \tilde{h})}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U} \tilde{h}) = \nabla\left(\lambda \nabla T + \nabla \frac{\mu_t h}{Pr_t}\right) + \nabla(\bar{U} \tau^{\text{eff}}); \quad (4)$$

- уравнение переноса энергии:

$$\tau_{ij}^{\text{eff}} = \tau_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right); \quad (5)$$

- уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon; \quad (6)$$

- уравнение вихревой диссипации:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon_1} P_k - C_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon); \quad (7)$$

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2 \partial U_k}{3 \partial x_k} \left(3 \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right), \quad (8)$$

где \bar{U} – вектор скорости; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость; $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ – турбулентная вязкость; λ – коэффициент теплопроводности; P – давление; T – температура; h – энтальпия; $\tilde{h} = h + \bar{U}\bar{U}/2$ – полная энтальпия; ∇ – оператор Гамильтона; C_{ij} – константы.

Упрощение в виде использования однофазной среды (воздуха) на этапе разработки методики позволило значительно снизить время расчетов. Дискретизация уравнений (2–8) в ANSYS CFX реализуется с использованием метода контрольного объема [5]. Для аппроксимации по времени всех уравнений была применена разностная схема Эйлера второго порядка.

Обработка результатов включала получение дискретных данных о температуре потока на границах трубы, которые после были экспортированы с помощью созданного на языке CCL автоматического алгоритма. На рис. 2. представлено распределение температуры для начального момента времени.

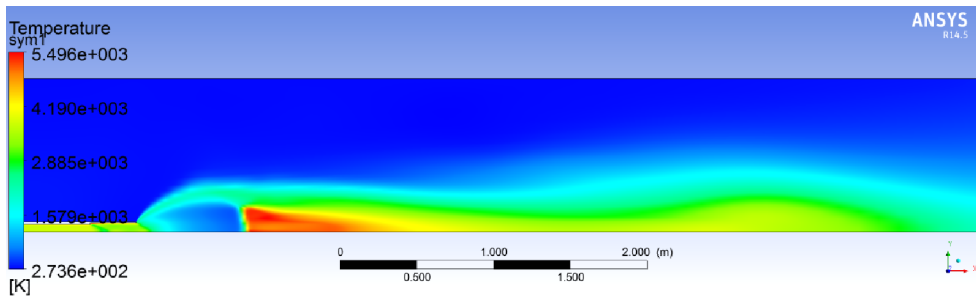


Рис. 2. Распределение температуры для начального момента времени

На третьем этапе полученные группы решений были усреднены в пакете Matlab. Пример результатов усреднения представлен на рис. 3. Синим цветом изображены кривые, описывающие температуру в сечении для различных моментов времени, а красным – усредненные значения. На некоторых участках наблюдаются зоны с установившимся потоком. В целом установлено, что течение струи лежит в некотором коридоре, в отдельных случаях наблюдается периодичность результатов. Полученные данные в дальнейшем используются в качестве граничных условий в модели нестационарной теплопроводности на 4-м этапе описанного ранее алгоритма исследования.

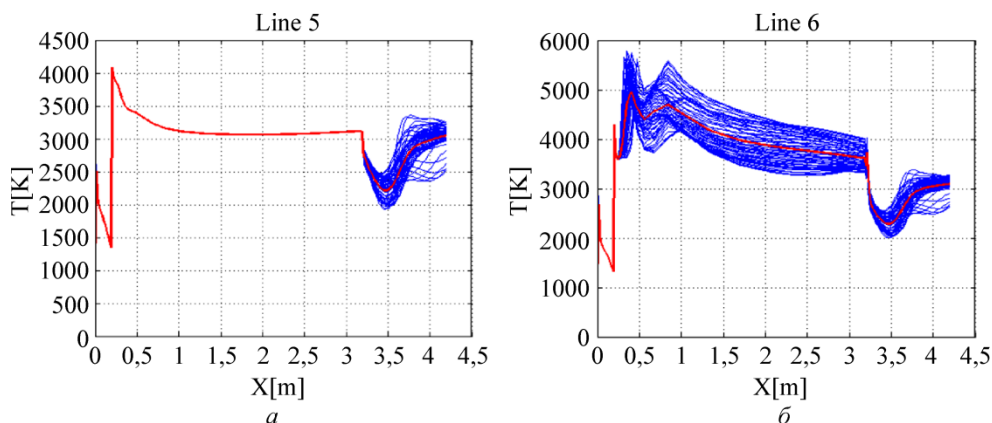


Рис. 3. Распределение температуры: *a* – сечение по внутреннему радиусу; *б* – сечение по внешнему радиусу

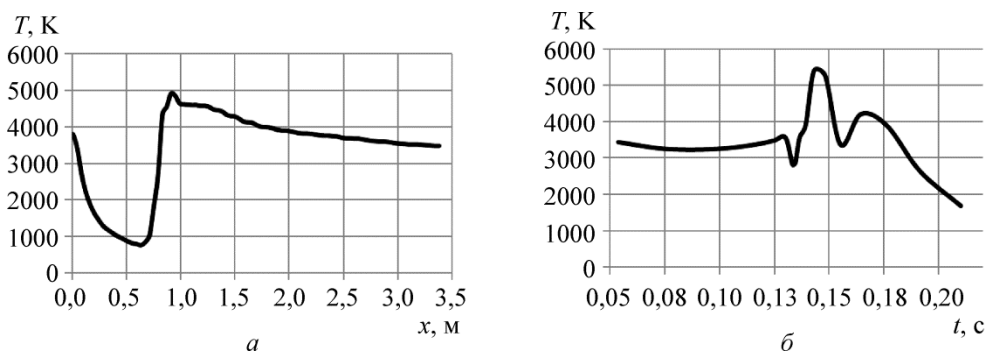


Рис. 4. Распределение температуры: *a* – на уровне внутренней стороны трубы для начального момента времени; *б* – на правом торце в зависимости от времени

Структура струи включает участок пониженной температуры непосредственно после сопла (см. рис. 2) с переходом на пиковое значение на расстоянии 0,9 м (рис. 4, *a*). До вылета снаряда (0,13 с) температура на внутренней стороне трубы держится на постоянном уровне 3400 К (рис. 4, *б*). В момент совпадения участка пиковой температуры струи (0,145 с) с входом трубы происходит мгновенный нагрев до значений 5000 К и выше, что объясняется стесненным объемом воздуха в трубе.

Таким образом, представленная методика позволяет качественно и количественно оценить температурное воздействие вылета снаряда на трубу специального назначения, в частности пиковые значения температуры, а также предоставляет данные для дальнейшего исследования в рамках задачи теплопроводности трубы. Применяемая методика позволила снизить ресурсоемкость исследования за счет исключения изменения сетки, присущей стандартному подходу решения подобных задач.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации Постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
2. Kovacevic A., Rane S., Pascu M., Performance optimization of screw compressors based on numerical investigation of the flow behavior based on different grid generation approach // Trends in the Development of Machinery and Associated Technology: Proceedings of the 16th International Research/Expert Conference. – Dubai, 2012.
3. Grid deformation strategies for CFD analysis of screw compressors / S. Rane, A. Kovacevich, N. Stosic, M. Kethidi // Computers & Fluids. – 2014. – P. 124–141.
4. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Применение деформируемых сеток для численного моделирования течений в областях с подвижными границами // Научно-технические ведомости. – 2006. – № 1 (47). – С. 15–22.
5. Сметанников О.Ю., Поносков Н.П. Исследование газодинамического нестационарного потока с подвижными границами в ANSYS CFX // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 5. – С. 45–48.
6. Набережнова Г.В., Нестеров Ю.Н. Неустойчивое взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи с цилиндрической полостью // Ученые записки ЦАГИ. – 1983. – Т. 14, № 4.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
8. Волков К.Н. Дискретизация уравнений Навье–Стокса на подвижных неструктурированных сетках // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – С. 256–273.

References

1. Belotserkovskii O.M., Davydov Iu.M. Metod krupnykh chastits v gazovoi dinamike. Vychislitel'nyi eksperiment [Method of large particles in gas dynamics. Computational experiment]. Moscow, 1982. 392 p.

2. Kovacevic A., Rane S., Pascu M. Performance optimization of screw compressors based on numerical investigation of the flow behavior based on different grid generation approach. *Proceedings of the 16th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*. Dubai, 2012.

3. Rane S., Kovacevich A., Stosic N., Kethidi M. Grid deformation strategies for CFD analysis of screw compressors. *Computers & Fluids*, 2014, pp. 124-141.

4. Smirnov E.M., Zaitsev D.K. Primenenie deformiruemykh setok dlia chislennogo modelirovaniia techenii v oblastiakh s podvizhnymi granitsami [The application of deformable meshes for numerical simulation of flows in domains with moving boundaries]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti*, 2006, no. 1, iss. 47, pp. 15-22.

5. Smetannikov O.Iu., Ponosov N.P. Issledovanie gazodinami-cheskogo nestatsionarnogo potoka s podvizhnymi granitsami v ANSYS CFX [The study of unsteady gas dynamic flow with moving boundary in ANSYS CFX]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2012, no. 5, pp. 45-48.

6. Naberezhnova G.V., Nesterov Iu.N. Neustoichivoe vzaimodeistvie sverkhzvukovoi nedorasshirennoi strui s tsilindricheskoi polost'iu [Unsteady interaction of supersonic jet with nedorasshirennoi cylindrical cavity]. *Uchenye zapiski Tsentral'nogo aerodinamicheskogo instituta*, 1983, vol. 14, no. 4.

7. Loitsianskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid mechanics]. Moscow, 2003. 840 p.

8. Volkov K.N. Diskretizatsiia uravnenii Nav'e–Stoksa na podviznykh nestrukturirovannykh setkakh [Discretization of the Navier-Stokes equations on moving unstructured meshes]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2008, vol. 9, pp. 256-273.

Получено 30.11.2015

Об авторах

Сметанников Олег Юрьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sou2009@mail.ru).

Ильиных Глеб Валентинович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Вычислительная математика и механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

нальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ilinykh.pnipu@yandex.ru).

About the authors

Oleg Iu. Smetannikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sou2009@mail.ru).

Gleb V. Il'inykh (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ilinykh.pnipu@yandex.ru).