УДК 533.6.072:536.244 DOI: 10.15372/PMTF202215140

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СТЕНОК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ

И. Р. Васнев, Н. Н. Федорова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия E-mails: vasnev@itam.nsc.ru. nfed@itam.nsc.ru

Представлены результаты расчетов сверхзвуковых турбулентных течений в канале с учетом сопряженного теплообмена между воздушным потоком и медной пластиной, моделирующей чувствительный элемент термопары. Численное моделирование выполнено при числах Маха набегающего потока $M_{\infty} = 3, 4, 5$. Показано, что результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, полученными в импульсной аэродинамической установке. Установлено, что при значениях времени порядка 100 мс сопряженный теплообмен со стальными стенками модели можно не учитывать.

Ключевые слова: численное моделирование, сверхзвуковое течение, сопряженный теплообмен

Введение. Тепловая защита стенок технических устройств является важной проблемой сохранения целостности конструкций, особенно при сверхзвуковых скоростях, когда тепловые потоки на стенках могут достигать нескольких мегаватт на метр квадратный [1]. Для исследования тепловых нагрузок на стенки каналов технических устройств при воздействиях высоких температур активно используется численное моделирование [2]. Целью настоящей работы является тестирование численной модели для расчета теплообмена сверхзвукового турбулентного течения со стенками канала. Расчеты проведены для условий эксперимента [1], в котором исследованы реагирующие течения водородно-воздушной смеси. Расчеты выполнены без учета химических реакций и соответствуют условиям, которые реализуются в начале экспериментального канала до зоны инжекции топлива. Более подробно геометрическая модель, входные условия и результаты экспериментов, используемые для верификации математической модели, представлены в [1].

Постановка задачи и математическая модель. Расчет проводился в двумерной постановке для области, геометрия которой соответствует начальному участку экспериментальной модели с учетом вертикальной симметрии (рис. 1). Математическая модель включает осредненные по Фавру уравнения Навье — Стокса, дополненные уравнением состояния идеального газа и моделями турбулентности $(k-\varepsilon)$ -RNG и $(k-\omega)$ -SST. В расчетной области, соответствующей твердому телу, решалось уравнение теплопроводности.

Условия на входной границе (табл. 1) соответствовали экспериментальным. Эксперименты при значении числа Маха M = 4, результаты которых использованы для валидации

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-08-00959) с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра НГУ.



Рис. 1. Расчетная область: 1 — вход, 2 — стенка, 3 — изоляция, 4 — датчик, 5 — выход

Таблица 1

Значения параметров на входе в канал при различных числах Маха

M_{∞}	<i>P</i> ₀ , кПа	$P_{\infty},$ кПа	T_0, K	T_{∞}, K
3	1600	45	1900	676
4	9100	60	2000	476
5	32000	71	2700	452

математической модели, проведены в режиме присоединенного трубопровода с использованием мультипликатора, что обеспечило постоянство условий на входе в модельный канал в течение приблизительно 100 мс. Входные параметры для M = 3; 5 получены в экспериментах без мультипликатора и соответствовали моментам времени, в которые давление и температура торможения имеют максимальные значения. Поскольку в экспериментах без мультипликатора эти параметры со временем уменьшаются, расчеты позволяют получить верхнюю оценку температуры датчика и тепловых потоков.

На верхней границе расчетной области (см. рис. 1) задано условие симметрии, на выходе — статическое давление, на стенках — условие прилипания и одно из тепловых краевых условий (КУ):

— изотермической стенки

$$T\big|_{wall} = 300 \text{ K}; \tag{1}$$

— сопряженного теплообмена

$$T_f\big|_{wall} = T_s\big|_{wall}, \qquad |q_f| = |q_s|; \tag{2}$$

— адиабатической стенки

$$\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{wall} = 0; \tag{3}$$

— конвективного теплообмена

$$q_{conv}\big|_{wall} = \alpha (T_{wall} - T_{\infty}), \tag{4}$$

где T_f , T_s — температуры в газовой (индекс f) и твердой (индекс s) зонах; q_f , q_s — тепловые потоки на границах газовой и твердой зон; q_{conv} — тепловой поток на внешней стенке канала; T_{∞} — температура внешней среды; α — коэффициент теплоотдачи.

Параметры расчетных сеток							
Тип сетки	Количество элементов	Минимальная высота ячейки, м	y_1^+				
Сетка 1	35000	$1,5 \cdot 10^{-4}$	50,0				
Сетка 2	140 000	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$_{9,0}$				
Сетка 3	250000	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,\!0$				
Cotra 1	500.000	$6.0.10^{-7}$	0.6				

Таблица 2

Расчет проводился в три этапа. На первом этапе с целью получения профилей газодинамических и турбулентных параметров на входе в расчетную область проведен расчет стационарного течения в прямоугольном канале с тепловыми условиями (1). На входе в канал заданы соответствующие экспериментальным значения числа Маха, статического давления и температуры (см. табл. 1), а также параметры турбулентности, выбранные в соответствии с условиями аэродинамической установки. После завершения расчета в сечении, где толщина пограничного слоя достигает значения $\delta = 11$ мм, записываются данные о профилях газодинамических и турбулентных параметров. Расчетные профили скорости согласуются с экспериментальными, измеренными на входе в модельный канал.

На втором этапе рассчитано стационарное сверхзвуковое течение воздуха в канале, на входе в который заданы полученные на первом этапе профили. На нижней границе, включающей стальную стенку и поверхность датчика, задано условие (1).

На третьем этапе решена нестационарная задача во всей расчетной области, включающей "жидкую" и "твердую" зоны. На границе газ — датчик задано КУ (2), на остальных границах датчика — КУ (3). На стальных стенках использованы различные условия (1)-(3). На внешней стенке канала заданы соответствующие лабораторным КУ (4) с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 8~{
m Br}/({
m M}^2\cdot{
m K})$ и температурой $T_\infty = 300~{
m K}$. В качестве начальных данных использовано стационарное решение, полученное на втором этапе.

Расчетная сетка и численный метод. Вычисления проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. Структурированная расчетная сетка состояла из четырехугольных элементов и сгущалась в направлении стенок. На первом этапе выполнены расчеты на последовательности сеток (табл. 2). Максимальное различие профилей скорости и температуры, полученных на сетках 3 и 4, не превышает 0.01 %. Все расчеты, результаты которых приведены ниже, выполнялись на сетке 3.

Сопряженная задача решена в нестационарной постановке. Для аппроксимации по времени использована неявная схема второго порядка, по пространству — противопотоковая схема второго порядка. Шаг по времени в газовой и твердой средах одинаковый $(\tau = 5 \cdot 10^{-6})$ и выбран таким образом, чтобы на каждом временном шаге за 30 внутренних итераций обеспечить уменьшение невязок всех уравнений на три порядка. В качестве критерия установления процесса сопряженного теплообмена выбрано условие уменьшения начального теплового потока в 100 раз.

Результаты расчетов и их анализ. Для валидации математической модели использованы $(k-\varepsilon)$ -RNG- и $(k-\omega)$ -SST-модели турбулентности. На рис. 2 представлены результаты расчетов для $M_{\infty} = 4$ и экспериментов, показывающие, что при t < 100 мс численные решения для КУ (1) и (2) на стальной стенке совпадают. Это означает, что нагревом стальных стенок при таких значениях времени можно пренебречь. В дальнейших расчетах будет использоваться модель $(k-\omega)$ -SST, поскольку она более точно описывает экспериментальные данные.



Рис. 2. Зависимость температуры датчика от времени при M = 4: 1 — эксперимент, 2 — расчет с использованием $(k-\omega)$ -SST-модели и КУ (1), 3 — расчет с использованием $(k-\varepsilon)$ -RNG-модели и КУ (1), 4 — расчет с использованием $(k-\omega)$ -SST-модели и КУ (2)



Рис. 3. Профили температуры вблизи стальной стенки, полученные в расчетах при $M_{\infty} = 4$ и KУ (2) в различные моменты времени: 1 — t = 0, 2 - t = 100 мс, 3 — t = 2000 мс

На рис. 3 представлены безразмерные расчетные профили температуры в сечении, расположенном между входом и датчиком, в различные моменты времени для КУ (2) на стальной стенке. Область y < 0 соответствует твердому телу, y > 0 — газовой среде. Видно, что за время t = 100 мс температура на поверхности стенки увеличилась на 20 %, а максимальная температура газа в пристенной области — на 0,8 %, что подтверждает незначительное влияние прогрева стенки на профиль температуры в газовой среде. При t = 2000 мс температура стенки увеличилась на 67 %, а температура газа — на 4,8 %.

На рис. 4 представлены результаты сопряженных расчетов при различных значениях числа Маха для КУ (1) и (2) на стальной стенке.

Для оценки максимально возможных температур прогрева датчика выполнены расчеты для КУ (3) на стальных стенках модели. Результаты этих расчетов представлены в табл. 3 ($t_{\rm np}$ — время прогрева датчика для расчетов с КУ (1) на стальной стенке; $T_{\rm ag}$ адиабатическая температура стенок; $T_{\rm np}$ — температура датчика в момент времени $t_{\rm np}$). Временной интервал, в котором нагрев стенки не оказывает влияния на температуру дат-



Рис. 4. Зависимости температуры датчика от времени, полученные в расчетах с КУ (1) (сплошные линии) и КУ (2) (штриховые линии) при различных значениях числа Маха:

 $1 - M_{\infty} = 3, 2 - M_{\infty} = 4, 3 - M_{\infty} = 5$

M_{∞}	КУ	$t_{\rm \pi p}, {\rm c}$	$q_0, \mathrm{MBt/m^2}$	T_{ad}, K	$T_{\rm np}, {\rm K}$
3	(1)	- 3,0	0,9	1617	789
	(2)				842
4	(1)	2,0	1,5	1625	850
	(2)				916
5	(1)	1,6	2,6	2191	1077
	(2)				1180

Таблица 3 Тепловые параметры при различных числах Маха

чика, уменьшается с увеличением числа Маха. Максимальные начальный тепловой поток и температура датчика получены при $M_{\infty} = 5$, а время прогрева в этом случае минимально. Максимальные температуры датчика, полученные в расчетах с КУ (1) и КУ (2) на стальной стенке, различаются на 6,3; 7,2; 8,7 % при M = 3, 4, 5 соответственно.

Заключение. Верифицирован алгоритм расчета высокоскоростных течений в канале с учетом сопряженного теплообмена. Выполнено численное моделирование прогрева медного датчика тепловыми потоками в условиях экспериментов в импульсной высокоэнтальпийной аэродинамической установке, результаты которых использованы для валидации математической модели. Показано, что в случае использования $(k-\omega)$ -SST-модели турбулентности результаты расчетов лучше согласуются с экспериментальными данными, чем в случае использования $(k-\varepsilon)$ -RNG-модели. Для различных значений числа Маха определены временные отрезки, на которых нагревом стальных стенок модели можно пренебречь. Показано, что с ростом числа Маха максимальная температура газа в пристенной области и тепловой поток увеличиваются, а временной промежуток, в течение которого справедливо предположение об изотермичности стенки, уменьшается. Дальнейшие исследования будут посвящены решению сопряженной тепловой задачи для "падающих" условий на входе в модельный канал, которые реализуются в экспериментах без использования мультипликатора.

ЛИТЕРАТУРА

- Goldfeld M. The heat flux research in hydrogen supersonic combustor at Mach number of 4 // Intern. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 13365–13376.
- Зинченко В. И., Гольдин В. Д., Зверев В. Г. Исследование характеристик тепломассообмена теплозацитных материалов при больших временах полета // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 2. С. 108–120.

Поступила в редакцию 24/V 2022 г., после доработки — 15/VII 2022 г. Принята к публикации 25/VII 2022 г.