



МИНОБРНАУКИ РФ
Российский фонд
фундаментальных исследований
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета
Физико-технический факультет
Совет молодых учёных ТГУ



**VIII Всероссийская молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики – 2018»
г. Томск, 26–28 ноября 2018 г.**

**VIII All-Russian Scientific Conference
«Current issues of
continuum mechanics and celestial mechanics – 2018»,
November, 26–28, 2018**

Томск-2019

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ МОДЕЛИ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

¹ Н.П. Скибина, ¹ Н.В. Савкина, ¹ В.В. Фарапонов, ² Е.А. Маслов

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

uss.skibina@gmail.com

Ключевые слова: аэродинамика, вычислительная гидродинамика, коэффициент лобового сопротивления, импульсная аэродинамическая установка.

Аннотация. Цель данной работы заключается в математическом моделировании процесса сверхзвукового обтекания модели в рабочей части импульсной аэродинамической установки потоком воздуха со скоростью $M = (2\div 5)$. Исследуемые модели представляют клин и конус с углом полураствора 15° , но при этом структура течений вблизи тел различна. Выбор геометрии обусловлен тем, что ранее для данных моделей были проведены серии экспериментальных исследований.

Задача высокоскоростного обтекания модели решалась с использованием вычислительной среды Ansys Fluent. Математическое описание процесса осуществлялось системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, в качестве модели турбулентности выбрана модель сдвиговых напряжений Ментера.

Рассогласование экспериментальных данных и результатов расчета по величине скорости потока составило 3%. Качественное сравнение кадров визуализации обтекания с полями распределения газодинамических величин, полученных в ходе расчета, показало хорошее совпадение результатов физического и математического моделирования.

NUMERICAL ANALYSIS OF GASDYNAMIC PARAMETERS OF SUPERSONIC FLOW AROUND MODEL IN EXPERIMENT CHAMBER OF AERODYNAMIC WIND TUNNEL

¹ N.P. Skibina, ¹ N.V. Savkina, ¹ V.V. Faraponov, ² E.A. Maslov

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation

uss.skibina@gmail.com

Keywords: aerodynamic; computational fluid dynamics; aerodynamic drag coefficient; pulsed wind tunnel.

Abstract. The main purpose of this article is the mathematical modeling of the supersonic flow around model in experimental chamber of pulsed aerodynamic wind tunnel. Airflow rate in Mach number varied in range $M = (2\div 5)$. The trial models represent a wedge and a cone with half angle of 15° , but flow has differently structure around bodies. The choice of bodies' geometry due a series of experiments that carried out for these models earlier.

The problem of high-speed flow the model solved using the Ansys Fluent computing environment. The mathematical description of the process carried out by a system of Reynolds-averaged Navier–Stokes equations, the Menter shear stress model was chosen as the turbulence model.

The discrepancy between the experimental data and the results of the calculation by the magnitude of the flow velocity was 3%. A qualitative comparison of the frames of visualization of the flow around the fields of distribution of gas-dynamic quantities obtained during the calculation showed a close agreement between the results of physical and mathematical modeling.

В настоящее время ведется интенсивная работа по созданию высокоскоростных летательных аппаратов военного и гражданского назначения, что в свою очередь приводит к необходимости изучения аэродинамики, тепломассообмена и механики полета на больших скоростях. Актуальность исследований подтверждается выполняемыми исследовательскими программами и опытно-конструкторскими работами, реализуемыми на территории Европы, США, Японии, Индии и Российской Федерации [1, 2].

Одной из главных задач наземных испытаний летательных аппаратов и их частей является воспроизведение реальных атмосферных и близких к ним условий эксперимента при исследовании аэродинамических характеристик моделей. Использование теории подобия физических процессов и явлений позволяет моделировать различные эффекты, например, вязкости (подобие по числу Рейнольдса) и сжимаемости (подобие течений по числу Маха).

Импульсная аэродинамическая установка [3, 4] используется для проведения различных экспериментальных исследований в высокоскоростных потоках со скоростями потока в числах Маха $M=(2\div 7)$. Основными достоинствами данной установки являются ее надежность, широкий диапазон режимов работы, низкие расходы сжатого газа и электроэнергии.

Проведение измерений в сверхзвуковых и гиперзвуковых потоках – трудоемкий процесс, организация и проведение которого требуют учета различных аспектов. Регистрирующие приборы могут вносить возмущения в поток и искажать картину течения, провоцировать возникновение отрывных течений и высоких градиентов давления. В данном случае математическое моделирование является менее ресурсозатратным способом исследований, позволяющим получать информацию о распределении газодинамических величин для любой интересующей части потока. Результаты экспериментального исследования при этом являются критерием оценки адекватности используемого подхода: в ходе сравнения результатов математического моделирования и данных, полученных опытным путем, можно судить о достоверности результатов комплексного физико-математического моделирования.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса обтекания тела, установленного в рабочей части ударной аэродина-

мической трубы, потоком воздуха при числах Маха $M=(2 \div 5)$. В качестве моделей выбраны клин и конус [5]. Выбор геометрии обусловлен тем, что ранее для данных моделей были экспериментально изучены аэродинамические характеристики [6, 7] и получена информация о газодинамических параметрах обтекания тел. Модели имеют одинаковое сечение с углом полураствора 15 градусов, при этом необходимо отметить, что структура течения вблизи тел различна.

Методом конечных элементов, реализованным в вычислительной среде Ansys Fluent, осуществлялось решение системы осредненных уравнений Навье–Стокса в декартовых координатах [8, 9]. Для моделирования эффектов турбулентности была использована SST модель [10]. Расчетная сетка структурирована, состояла из гексагональных элементов со сгущением по мере приближения к поверхности исследуемой модели, что позволяет получить хорошее разрешение течения в пограничном слое.

Относительная погрешность результатов численного расчета и результатов эксперимента составила не более 3%. Качественное сравнение картин обтекания, полученных экспериментально – фрагменты видеосъемки процесса высокоскоростной видеокамерой, и полей распределения рассчитанных газодинамических параметров показало хорошее согласование математического и физического моделирования.

В ходе работы разработана методика численного расчета, позволяющая получать значения аэродинамических характеристик моделей и термогазодинамических параметров обтекания тел в рабочей части при заданной скорости набегающего потока. База данных, сформированная в ходе физического и математического моделирования [4], позволяет изучать аэродинамику тел более сложной формы и моделировать их обтекание сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками.

Таким образом, сочетание результатов численных расчетов и экспериментальных данных, используемых для задания начальных и граничных условий, позволяет получать достоверные данные об аэродинамических и термогазодинамических параметрах – скорости, давлении, температуре и плотности по всей области рабочей части аэродинамической установки.

Литература

1. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата Х-43 // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». 2010. №. 1.
2. Румынский А.Н., Чуркин В.П. Обтекание затупленных тел гиперзвуковым потоком вязкого излучающего газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1974. Т. 14. №. 6. С. 1553–1570.
3. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Маслов Е.А., Жарова И.К., Фарапонов В.В., Мацкевич В.В., Чижев С.Ю. Физическое моделирование обтекания тел плоской и осесимметричной формы сверхзвуковым

потоком // Труды Томского государственного университета. Т. 298. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. С. 84–88. DOI: 10.17223/9785751124199/17

5. *Фараонов В.В., Маслов Е.А., Чупашев А.В., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания тел плоской и осесимметричной формы // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск.* Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 144–145.

6. *Артонкин В.Г., Леутин П.Г., Петров К.П. и др.* Аэродинамические характеристики острых и притупленных конусов при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях // *Тр. ЦАГИ.* 1972. Вып. 1413. 92 с.

7. *Шелудько Ю.В.* Измерение донного давления осесимметричных тел малого удлинения // *Физико-газодинамические баллистические исследования / под ред. Г.И. Мишина.* Л.: Наука, 1980. С. 68–77.

8. *Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фараонов В.В.* Численное моделирование обтекания цилиндрического тела сверхзвуковым потоком // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск.* Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 151–153.

9. *Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фараонов В.В.* Математическое моделирование газодинамических параметров потока в импульсной аэродинамической установке и численный расчет аэродинамических характеристик при обтекании тела в рабочей части: сб. трудов X всероссийской научной конференции, 3–5 сентября 2018 года, Томск. Томск: Томский государственный университет, 2018. С. 83–85.

10. *Снегурёв А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.

References

1. *Zheleznyakova A.L., Supzhikov S.T.* Chislennoe modelirovanie giperzvukovogo obtekaniya modeli letatel'nogo apparata X-43 // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. Baumana. Seriya «Mashinostroenie».* 2010. №. 1.

2. *Rumynskij A.N., Churkin V.P.* Obtekanie zatuplennykh tel giperzvukovym potokom vyzkogo izluchayushhego gaza // *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki.* 1974. Т. 14. №. 6. S. 1553–1570.

3. *Zvegintsev V.I.* Gas dynamic installation of short duration. Part I. Installations for scientific research. Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 s.

4. *Maslov E.A., Zharova I.K., Faraponov V.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Fizicheskoe modelirovanie obtekaniya tel ploskoj i osesimmetrichnoj formy sverkhzvukovym potokom // *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta.* Т. 298. Seriya fiziko-matematicheskaya: Aktual'nye problemy sovremennoj mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoj mekhaniki / pod red. M.Yu. Orlova. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2016. 136s. S. 84–88. DOI: 10.17223/9785751124199/17

5. *Faraponov V.V., Maslov E.A., Chupashev A.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Eksperimental'noe issledovanie obtekaniya tel ploskoj i osesimmetrichnoj formy // *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki: Sbornik trudov IX vserossijskoj nauchnoj konferentsii, 21-25 sentyabrya 2016 goda, g. Tomsk.* Томск: Томский государственный университет, 2016. S. 144–145.

6. *Artonkin V.G., Leutin P.G., Petrov K.P. i dr.* Aehrodinamicheskie kharakteristiki ostrykh i prituplennykh konusov pri dozvukovykh i sverkhzvukovykh skorostyakh // Tr. TSAGI, 1972. No.1413, 92 s.

7. *Shelud'ko Yu.V.* Izmerenie donnogo davleniya osesimmetrichnykh tel malogo udlineniya // Fiziko-gazodinamicheskie ballisticheskie issledovaniya / pod red. G.I. Mishina. L.: Nauka, 1980. S. 68–77.

8. *Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V.* (2016) Chislennoe modelirovanie obtekaniya cilindricheskogo tela sverkhzvukovym potokom// Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki (FPPSM-2016): Sbornik trudov IX vserossijskoj nauchnoj konferencii 21–25 sentyabrya 2016 goda, g. Tomsk. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet. Pp. 151–153.

9. *Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V.* (2018) Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh processov v impul'snoj aerodinamicheskoy ustanovke i chislennyj raschet nekotoryh parametrov obtekaniya tela, zakreplennogo v rabochej chasti // Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki (FPPSM-2018): Sbornik trudov X vserossijskoj nauchnoj konferencii 3–5 sentyabrya 2018 goda, g. Tomsk. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet. Pp. 83–85.

10. *Snegiryov A.Yu.* Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenij. Proc. benefit SPb.: Publishing house Polytechnic University, 2009. 143 p.