

УДК 533.6.011:517.958

О свойствах критической линии тока при сверхзвуковом обтекании несимметричного гладкого выпуклого тела

Сизых Григорий Борисович¹
Чернов Сергей Валерьевич^{2(*)}

o1o2o3@yandex.ru
s_chernow@mail.ru

¹ МФТИ, Москва, Россия

² ФАУ «ЦАГИ», Жуковский, Россия

Аннотация. Исследовано пространственное стационарное изоэнергетическое течение идеального газа за отошедшим скачком уплотнения перед гладкой выпуклой головной частью. Уравнение состояния — произвольное двухпараметрическое. Без предположений о какой-либо симметрии течения доказано, что критическая линия тока пересекает скачок по нормали, завихренность на ней равна нулю, а удельная энтропия на поверхности головной части максимальна.

Ключевые слова: уравнения Эйлера, критическая линия тока, равновесное приближение, двухпараметрическое уравнение состояния, энтропия на поверхности тела

Введение. Ранее в работе [1] без предположения о какой-либо симметрии были рассмотрены пространственные течения совершенного газа (уравнение состояния Менделеева — Клапейрона) с отошедшим скачком уплотнения при сверхзвуковом обтекании однородным потоком тел с гладкой выпуклой головной частью. Было показано, что критическая линия тока пересекает скачок по нормали, завихренность на ней равна нулю, а удельная энтропия на поверхности головной части максимальна.

В докладе представлено обобщение результатов [1] на более широкий класс течений, а именно на течения газов с произвольным двухпараметрическим уравнением состояния, к которым относятся, в частности, реагирующие газовые смеси в равновесном приближении.

Методы и материалы; результаты. Движение идеального газа удовлетворяет уравнениям Эйлера, а также уравнениям неразрывности и переноса энтропии [2], которые замыкаются двухпараметрическим уравнением состояния. Из этой системы уравнений в частных производных при дополнительном условии постоянства полной удельной энтальпии во всем поле течения получены две системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Одна система ОДУ получена для компонент вектора завихренности на произвольной линии тока. Другая — для компонент вектора плотности потока массы на произвольной вихревой линии. Из полученных систем ОДУ следуют два свойства: если на отрезке вихревой линии завихренность отлична от нуля, то скорость газа на всем таком отрезке либо отлична от нуля, либо тождественно равна нулю, и, аналогично, если на отрезке линии тока скорость отлична от нуля, то завихренность на всем таком отрезке либо отлична от нуля,

либо тождественно равна нулю. Отметим, что указанные свойства не зависят от конкретного вида уравнения состояния, а вытекают лишь из факта его существования.

С использованием этих свойств течения показано, что если критическая точка (передняя точка торможения) является изолированной, то в ней завихренность равна нулю. Далее с использованием критерия Зоравского [3] показано, что тогда на всей критической линии тока завихренность коллинеарна скорости. Вместе с уравнениями Эйлера это значит, что всюду на ней, включая ее начало на скачке уплотнения, равен нулю градиент удельной энтропии. Но на отошедшем скачке имеется единственная точка, где градиент энтропии равен нулю — это лидирующая точка, в которой скорость направлена по нормали к скачку. Следовательно, критическая линия тока начинается в лидирующей точке скачка. Поэтому завихренность на всей критической линии равна нулю, а удельная энтропия газа на ней достигает максимального значения, которое затем распространяется на всю поверхность головной части обтекаемого тела.

Заключение. Без предположения о какой-либо симметрии показано, что при стационарном пространственном обтекании тела с гладкой выпуклой головной частью однородным сверхзвуковым потоком идеального газа с произвольным двухпараметрическим уравнением состояния критическая линия тока пересекает отошедший скачок уплотнения по нормали, завихренность на ней равна нулю, а удельная энтропия максимальна на поверхности тела. Термодинамические параметры газа в точке торможения могут быть вычислены по параметрам набегающего потока с использованием соотношений на прямом скачке уплотнения для конкретного уравнения состояния и не зависят от конфигурации обтекаемого тела. Обнаруженные закономерности можно использовать для дополнительной верификации вычислительных программ и конкретных расчетов, как это было сделано, например, в работе [4] для совершенного газа.

Список источников

- [1] Сизых Г.Б. Значение энтропии на поверхности несимметричной выпуклой головной части при сверхзвуковом обтекании. *ПММ*, 2019, т. 83, вып. 3, с. 377–383.
- [2] Крайко А.Н. *Теоретическая газовая динамика (краткий курс)*. Москва, МФТИ, 2007, 300 с.
- [3] Prim R., Truesdell C. A derivation of Zorawski's criterion for permanent vector lines. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 1950, vol. 1, pp. 32–34.
- [4] Марков В.В., Харченко Н.А. Верификация компьютерного кода ГРАТ методом Сизых. *Труды МФТИ*, 2024, т. 16, № 1, с. 119–128.