

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В УДАРНОМ СЛОЕ НА СТРУКТУРУ ПОЛЯ ТЕЧЕНИЯ

А. Ф. Полянский, Л. И. Скурин

Известно, что при движении тела с большой сверхзвуковой скоростью в атмосфере воздух вблизи поверхности тела в ударном слое оказывается ионизованным. Падающая на такой слой электромагнитная волна передает частично свою энергию электронам, которые посредством возбуждения колебательных степеней свободы молекул и электронных уровней атомов и молекул передают энергию газу. В работе [1], где исследовался этот процесс в рамках одномерной нестационарной задачи, показано, что поглощение электромагнитной энергии ионизованным слоем может быть значительным. С учетом того обстоятельства, что параметрами как ионизованного слоя, так и электромагнитной волны при необходимости можно управлять, использование энергии волны можно рассматривать как практический способ воздействия на поле течения.

Представляет интерес вопрос о динамических и тепловых эффектах, связанных с энерговыделением в ударном слое. Эти эффекты исследуются в настоящей работе посредством их моделирования на задаче осесимметричного, стационарного, сверхзвукового обтекания затупленного тела потоком вязкого совершенного газа при наличии заданного источника энерговыделения в ударном слое. Близкая по постановке задача рассматривалась в работе [2]. Рассмотрение в [2], однако, проведено в невязкой постановке (и, следовательно, без анализа влияния энерговыделения на тепловой поток) и ограничено случаем выделения энергии лишь в сверхзвуковой области ударного слоя.

В основе исследования в настоящей работе лежит модель вязкого ударного слоя [3]. Правая часть уравнения энергии содержит слагаемое, описывающее энерговыделение.

Для решения системы уравнений вязкого ударного слоя использовался метод глобальных итераций в той модификации, которая описана в [4]. Численная реализация метода в настоящей работе отличается от использованной в [4] относительной простотой. Программа для ЭВМ апробирована посредством сопоставления расчетных данных с данными, полученными в [5] на основе полной системы уравнений Навье—Стокса для лобовой части сферы при значении чисел Рейнольдса $Re=10^4$ и Маха $M=15$.

Ниже анализируются полученные расчетом данные по структуре ударного слоя в случае энерговыделения в нем. Данные относятся к обтеканию кругового гиперболоида, контур которого описывается уравнением $R_b = \sqrt{\xi^2 + 2\xi}$, где ξ — координата, отсчитываемая вдоль оси симметрии; R перпендикулярно к оси (линейные размеры отнесены к радиусу кривизны тела в передней критической точке R_0). Принято, что $M=20$, $Re=10^4$, число Прантля 0.75, стенка холодная; коэффициент динамической вязкости вычислялся по формуле Сатерленда. Расчеты, как правило, проводились с шагом $\Delta x=0.2$ и с числом узлов по поперечной координате, равным 16 (x — координата, отсчитываемая от передней критической точки, вдоль контура тела).

Номер варианта	Q_0	l	x_0	Номер варианта	Q_0	l	x_0
1	0	—	—	6	0.5	0.4	0
2	0.4	0.4	0	7	0.075	3	0
3	0.4	0.8	0	8	0.075	0.4	2
4	0.3	0.4	0	9	0.075	0.8	2
5	0.3	0.8	0				

Величина энергии Q , выделяющейся в единицу времени в единице массы газа, считалась не изменяющейся поперек ударного слоя (и, конечно, в окружающем направлении), а изменение ее вдоль контура задавалось соотношением

$$Q(x) = Q_0 \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{l} \right)^2 \right], \quad Q_0 = \text{const.}$$

Приводимые на рисунках данные относятся к следующим вариантам задания параметров в этой формуле (см. таблицу).

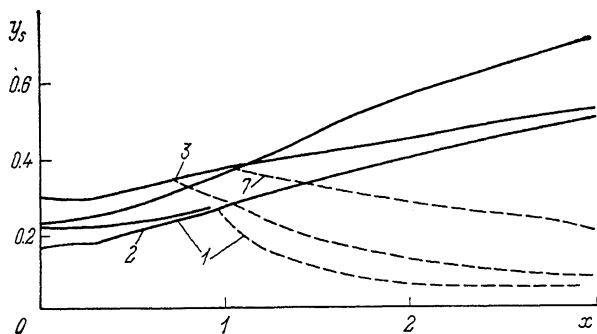


Рис. 1. Отход ударной волны и положение звуковой линии.

Величина Q_0 отнесена к поделенному на R_0 кубу скорости тела.

Цифры на всех рисунках соответствуют номерам вариантов этой таблицы. На рис. 1, 2 показаны влияние энергосвободения на отход ударной волны y_s (сплошные кривые) и положение звуковой линии (штриховые кривые). Данные рис. 1 относятся к случаю, когда область энергосвободения включает зону, которая при $Q_0=0$ является дозвуковой ($x_0=0$). Данные рис. 2 соответствуют случаю энергосвободения в зоне, которая при $Q_0=0$ является (исключая до-

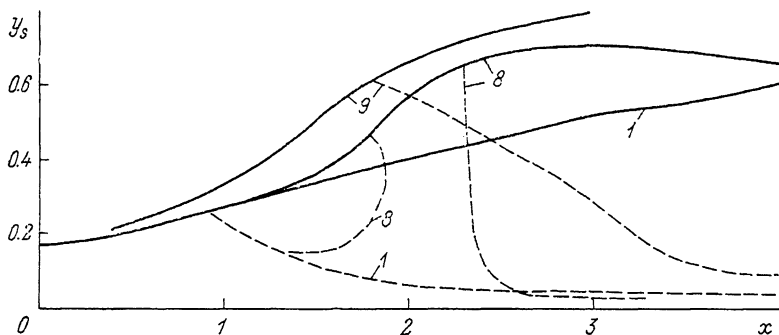


Рис. 2. То же, что и на рис. 1.

звуковой подслоем «пограничного слоя») сверхзвуковой ($x_0=2$). Видно, что отход волны в области энергосвободения увеличивается как с увеличением Q_0 , так и с увеличением l . В случае энергосвободения звуковая линия смещается вправо, что является естественным следствием увеличения энтальпии потока и скорости звука в нем. В случае энергосвободения при $x_0=2$ образующаяся обширная дозвуковая область может содержать локальную сверхзвуковую зону, как это имеет место в случае варианта 8.

Из сопоставления данных рис. 1 и 2 видно, что существенное воздействие на поток в случае $x_0=2$ оказывают значительно меньшие величины Q_0 (при одинаковых l), чем в случае $x_0=0$. Это обстоятельство подтверждается и сопоставлением кривых распределения давления вдоль поверхности тела для разных вариантов. Кривые давления для вариантов 2—6 несущественно отличаются

от кривой для варианта 1. Энерговыведение же при $x_0=2$ приводит к значительной деформации кривой давления.

Данные рис. 3 показывают распределение теплового потока вдоль контура тела. По оси ординат здесь отложено число Нуссельта

$$Nu = \frac{q_w R_0}{(H_\infty - H_w) \lambda_\infty},$$

где q_w — тепловой поток на поверхности тела, λ_∞ — коэффициент теплопроводности в невозмущенном потоке, H — полная энтальпия.

Из сопоставления кривых видно, что увеличение теплового потока в возмущенной зоне определяется величиной Q_0 и практически не зависит от l и α .

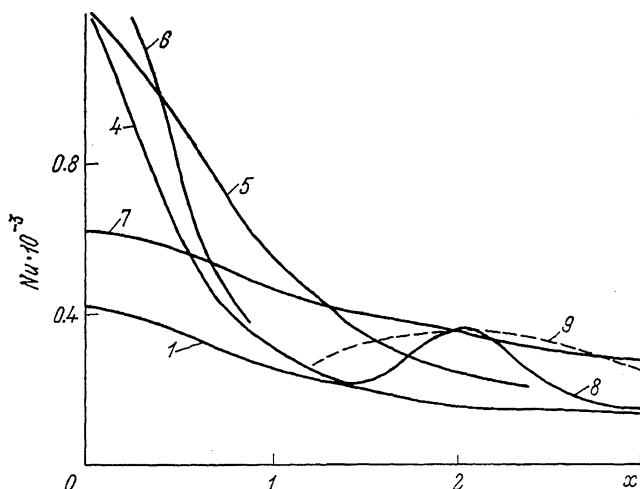


Рис. 3. Изменение параметра теплообмена вдоль поверхности тела.

Как показывают расчеты, энерговыведение одновременно с увеличением энтальпии и повышением теплового потока может приводить и к существенной деформации профиля скорости, который может стать немонотонным.

Таким образом, на примере обтекания конкретного тела выявлен характер изменения структуры ударного слоя у затупленного тела при наличии источников энерговыведения в нем. Указано на особенности в воздействиях энерговыведения на динамические и тепловые характеристики потока при различном расположении зоны энерговыведения и различных ее масштабах.

Список литературы

- [1] Кузьмин А. Г., Скурин Л. И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 6. С. 1085—1091.
- [2] Арафайлов С. К. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 4. С. 178—182.
- [3] Белоцерковский О. М., Головачев Ю. П., Грудницкий В. Г. и др. Численное исследование современных задач газовой динамики. М.: Наука, 1974. 397 с.
- [4] Васильевский С. А., Турский Г. А., Утюжников С. В. // ЖВММФ. 1987. Т. 27. № 5. С. 741—750.
- [5] Кокошинская Н. С., Павлов Б. М., Пасконов В. М. Численное исследование сверхзвукового обтекания тел вязким газом. М., 1980. 247 с.

Ленинградский
государственный университет

Поступило в Редакцию
12 июня 1990 г.