

9. Мурзинов И. Н. Параметры подобия при истечении сильно недорасширенных струй в затопленное пространство. Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 4.
10. Лейтес Е. А. Моделирование силового воздействия сильно недорасширенной струи на плоскую поверхность, параллельную ее оси. Уч. зап. ЦАГИ, 1975, т. 6, № 1.

УДК 532.525.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СЛОЕ СМЕШЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА СПУТНОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ

И. М. КАРПМАН, В. Д. ТРАСКОВСКИЙ

(Москва)

Представлены результаты экспериментального исследования течения на начальном участке турбулентной недорасширенной струи, вытекающей из профилированного сопла с числом Маха на срезе $M_a=2.56$ в спутный поток с числом Маха $M_\infty=3.1$.

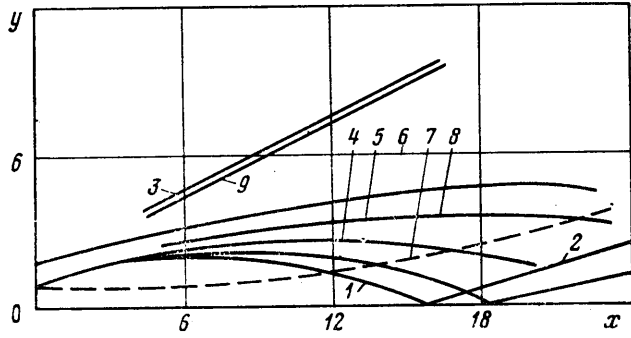
На основании анализа результатов измерения полей полного напора p_0 , температуры торможения T_0 и результатов расчета струи идеального газа получен профиль скорости в слое смешения недорасширенной струи в спутном сверхзвуковом потоке.

Важное свойство широкого класса турбулентных струйных течений вдали от источника возмущения состоит в приближенной автомодельности и универсальности безразмерного профиля продольной составляющей избыточной скорости [1, 2]. В число экспериментально исследованных случаев не входит, однако, случай истечения недорасширенной сверхзвуковой струи в спутный сверхзвуковой поток. В работе [3] для турбулентных недорасширенных струй, вытекающих в спутный сверхзвуковой поток, в широком диапазоне параметров экспериментально установлена автомодельность по степени нерасчетности струй полей полного напора и температуры торможения. Установленная автомодельность полей может быть использована при построении приближенных методов расчета недорасширенных струй. Для этих же целей полезно знать вид профиля скорости в вязком слое недорасширенной струи.

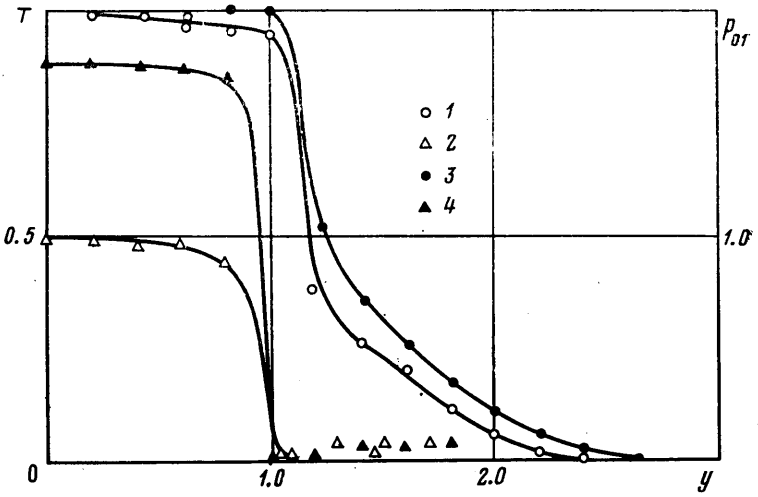
Схема течения на начальном участке спутной недорасширенной струи при степени нерасчетности $n=p_a/p_\infty=16$ приведена на фиг. 1 в координатах $y-x$, отнесенных здесь и ниже к радиусу сопла. Линии 1-3 обозначают висчий, отраженный и внешний скачки уплотнения, линии 4-6 — «границы» струи, определенные по значениям безразмерной избыточной температуры торможения $T=(T_0-T_{0\infty})/(T_{0a}-T_{0\infty})$, соответственно равным 0.05, 0.5 и 0.95. Здесь P_a и P_∞ — статические давления на срезе сопла и во внешнем потоке, T_{0a} и $T_{0\infty}$ — температуры торможения струи и внешнего потока, T_0 — температура торможения газа в точке измерения.

Расширение струи у кромки сопла приводит к увеличению ее поперечного размера и отклонению слоя смешения, развивающегося на границе струи, в сторону спутного потока. Слой смешения постепенно поглощает пограничный слой, который образуется на наружной поверхности сопла. Взаимодействие расширяющейся струи с внешним потоком приводит вначале к некоторому поджатию слоя смешения. От места поджатия слоя смешения до отраженного скачка уплотнения ширина слоя растет примерно линейно (линия 7 на фиг. 1). При пересечении отраженного скачка уплотнения слой смешения претерпевает новое поджатие, связанное, в частности, с тем, что в точках пересечения с отраженным скачком внутренней ($T=0.05$) и внешней ($T=0.95$) границ слоя смешения интенсивность скачка различна. Одновременно отметим, что при степени нерасчетности $n=5.3$ внутренняя граница слоя смешения за отраженным скачком уплотнения приближенно параллельна оси струи до расстояния $x/R_a \approx 24$, которое почти в 3 раза превышает расстояние от среза сопла до центрального скачка уплотнения.

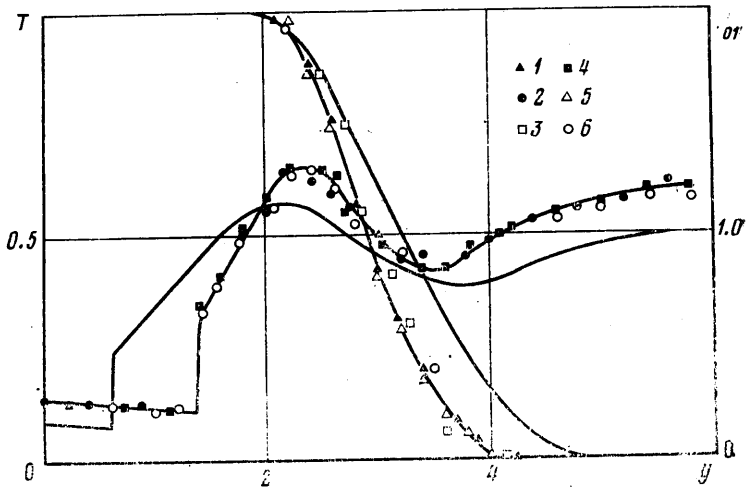
Результаты измерения полей полного напора $p_{01}=p_0/p_{0\infty}$ (здесь p_0 — полный напор в текущей точке, $p_{0\infty}$ — то же в спутном потоке) и безразмерной избыточной температуры торможения T приведены на фиг. 2-3. На фиг. 2 приведены «начальные» профили давления p_{01} и температуры T в сечении $x=0.1$ для $n=16$; 26 (кривые 1, 3 и 2, 4 соответственно). Существенным является наличие на внешней и внутренней поверхностях сопла пограничных слоев с развитым профилем температуры торможения, образованным за счет теплообмена через стенку сопла между внутренним и внешним потоками. Толщина внешнего динамического пограничного слоя, определенная по профилю p_{01} , равна примерно радиусу сопла, а толщина теплового слоя, определенная по профилю T , равна пример-



Фиг. 1



Фиг. 2

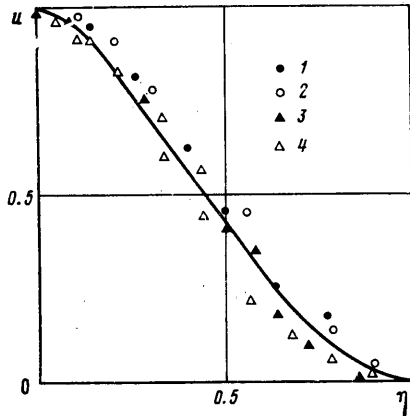


Фиг. 3

но 1.5 радиуса сопла. На фиг. 3 приведены профили p_{01} и T для $n=16$ при значениях числа $R=0.7 \cdot 10^6$, $2.1 \cdot 10^6$, $7 \cdot 10^6$ (точки 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 соответственно). Кривые являются профилями в сечении $x/L=0.88$, и в сечении $x/L=0.69$. Представленные кривые — результат осреднения экспериментальных величин, полученных при трех значениях степени нерасчетности струи $n=10$ ($R=1.31 \cdot 10^6$), 16 ($R=2.1 \cdot 10^6$) и 26 ($R=3.41 \cdot 10^6$). По оси абсцисс на фиг. 3 отложено отношение $y_1=y/n^{0.5}$. Из приведенных результатов видна автомодельность полей полного напора и безразмерной избыточной температуры торможения.

В случае, если скачки уплотнения в эксперименте и в расчете идеального невязкого газа совпадают, то с удовлетворительной точностью совпадают также замеренные и рассчитанные профили статического давления [3]. На фиг. 1 показаны положения висячего и внешнего скачков уплотнения, полученные в расчете струи идеального газа (линии 8 и 9). Видно, что для степени нерасчетности $n=16$ до сечения $x \approx 10$ висячий и внешний скачки уплотнения в эксперименте и расчете совпадают с удовлетворительной точностью. Вниз по течению от этого сечения висячий скачок в вязкой струе отесняется к оси слоем смещения. Поэтому положение его отличается от положения висячего скачка в струе идеального газа (линии 1 и 8 на фиг. 1). Для получения профиля скорости в вязком слое недорасширенной струи использовались результаты расчета профилей статического давления струи идеального газа, которые были выполнены по программе работы [4]. Профили скорости рассчитывались лишь для тех сечений, в которых скачки уплотнения в расчете и эксперименте совпадали. В качестве внутренней границы профиля скорости принималась точка со значением $T=0.95$, в качестве внешней — точка, где скорость в слое принимала значение, равное значению скорости на внешней границе теплового слоя ($T=0.05$).

Результаты обработки экспериментальных профилей p_{01} и T и расчетных профилей статического давления представлены на фиг. 4 в виде зависимости избыточной скорости $u=(u_0-u_1)/(u_2-u_1)$ от поперечной координаты $\eta=y/\delta$. Здесь u_0 — скорость в текущей точке динамического слоя смещения, u_1 и u_2 — соответственно скорость на внешней и внутренней границах динамического слоя, δ — толщина динамического слоя, определенная по рассчитанному профилю скорости, y — координата, отсчитываемая от внутренней границы слоя смещения. Точки 1, 2 соответствуют сечениям $x/L=6$, а 3, 4 — $x/L=8.6$, причем 1, 3 отвечают значению $n=16$, а 2, 4 — $n=26$. Представленные данные удовлетворительно описываются известной формулой Шлихтинга $u=(1-\eta^{1.5})^2$ (кривая на фиг. 4), полученной ранее [1, 2] для изобарических струй. Вид профиля скорости в недорасширенных струях при турбулентном режиме течения не зависит от числа Рейнольдса и степени нерасчетности струй.



Фиг. 4

Поступила 23 X 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
2. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
3. Авуевский В. С., Иванов А. В., Карпман И. М., Трасковский В. Д., Юделович М. Я. Структура турбулентных недорасширенных струй, вытекающих в затопленное пространство и спутный поток. Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, № 3.
4. Аверенкова Г. И., Ашратов Э. А., Волконская Т. Г., Дьяконов Ю. Н., Егорова Н. И., Мельников Д. А., Росляков Г. С., Усков В. И. Сверхзвуковые струи идеального газа, ч. 1. Истечение струй в вакуум. Истечение струй в спутный сверхзвуковой поток. Тр. вычисл. центра Моск. ун-та, 1970.