

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпрен У., Досандж Д. Исследование струи, истекающей из двумерного недорасширенного звукового сопла.— «Ракетн. техн. и космонавтика», 1968, т. 6, № 3.
2. Уэрл М., Шаффер Д., Дрифтмайер Р. Центральные скачки в свободных струях.— «Ракетн. техн. и космонавтика», 1970, т. 8, № 12.
3. Дрифтмайер Р. Корреляция параметров свободных струй.— «Ракетн. техн. и космонавтика», 1972, т. 10, № 8.
4. Иванов М. Я., Крайко А. Н., Назаров В. П. Некоторые результаты численного исследования нерасчетных пространственных струй идеального газа.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1972, № 4.
5. Simons G. A. The large time behavior of a steady spherical source expanding into an arbitrary ambient gas.— «AIAA Paper», 1970, N 232.
6. Белавин В. А., Голуб В. В., Набоко И. М., Опара А. И. Исследование нестационарной структуры потока при истечении ударного нагретого газа.— ПМТФ, 1973, № 5.
7. Набоко И. М., Кудрявцев Е. М., Опара А. И., Голуб В. В. Структура потока ударно-нагретого газа в условиях импульсного газодинамического лазера.— ТВТ, 1974, № 1.
8. Еремин А. В., Набоко И. М., Опара А. И. Полное рабочее время в ударной трубе при исследовании истечения из отверстия в торце.— ТВТ, 1973, № 4.

УДК 532.525.2 : 533.6.011.72

**ТИПЫ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ
С БЕЗГРАНИЧНОЙ ПЛОСКОЙ ПРЕГРАДОЙ**

И. П. Гинзбург, Е. И. Соколов, В. Н. Усков

(Ленинград)

В данной работе на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований указываются возможные типы волновой структуры, образующейся в первой бочке недорасширенной сверхзвуковой струи при ее взаимодействии с безграничной плоской преградой. Рассматривается влияние числа Маха, степени нерасчетности n , показателя изэнтропии k и расположения преграды h на волновую структуру.

1. Наиболее изучено теоретически взаимодействие струи, истекающей в вакуум ($n = \infty$), с безграничной плоской преградой [1, 2], находящейся за точкой отражения от оси первой характеристики AB (BD — отраженная характеристика) веера разрежения (фиг. 1).

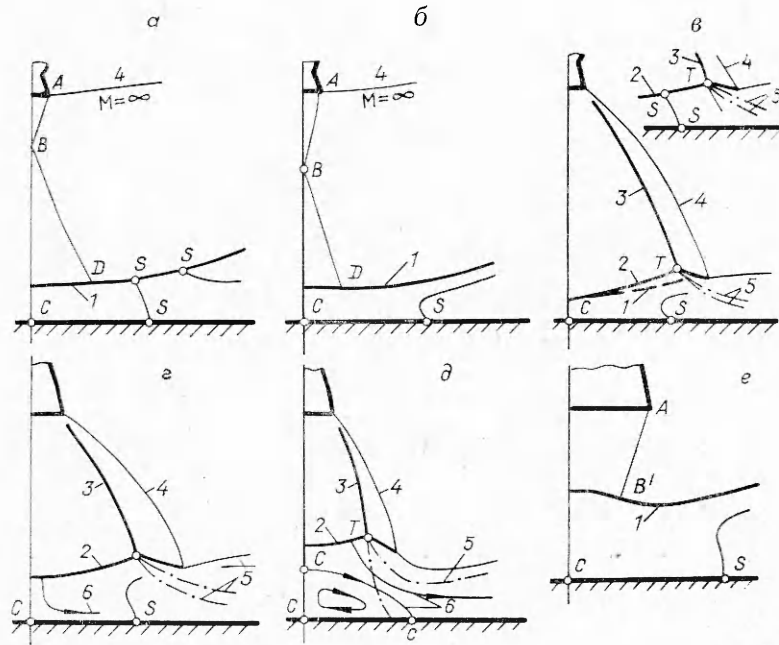
Как указано в [1], влияние неравномерности потока на выходе из сопла существенно лишь непосредственно вблизи него и не меняет качественной картины течения. Перед преградой образуется вогнутая к соплу ударная волна (центральный скачок уплотнения). За скачком возможны два типа течения, отличающиеся конфигурацией звуковой линии [1]:

1) Звуковая линия $S - S$ замыкается на центральный скачок уплотнения I . Расчеты методом установления [1] показали, что в этом случае на некотором расстоянии от точки выхода звуковой линии на скачок возникает вторая звуковая точка S (фиг. 1, *a*).

2) Вдоль центрального скачка образуется узкая дозвуковая область (фиг. 1, *b*), звуковая точка на скачке отсутствует. Тип звуковой области определяется значениями M и k [1].

2. При $n < \infty$ в струе появляется сжатый слой между границей струи 4 и висячим скачком уплотнения 3. Этот слой является источником возму-

щений, которые передаются вверх по потоку по дозвуковой области, заключенной между центральным скачком 2 и преградой. В зависимости от положения точки пересечения центрального и висячего скачков уплотнения их взаимодействие может происходить с образованием конфигураций из трех или четырех ударных волн. При этом вдоль тангенциального разрыва образуется зона смешения (с границей 5). В случае дозвукового течения за центральным скачком в точке пересечения T образуется тройная конфигурация (фиг. 1, *в*).



Фиг. 1

Форма центрального скачка вблизи точки T будет изменяться по сравнению с $n = \infty$, чтобы удовлетворить условиям равенства давлений и углов поворота на стационарном разрыве, исходящем из этой точки. Такая структура реализуется для больших значений M . Аналогичный процесс происходит и при наличии двух звуковых точек на центральном скачке уплотнения. Изменение формы центрального скачка ведет к росту его интенсивности и влечет за собой сокращение сверхзвукового участка течения за ним по сравнению со случаем взаимодействия струи с преградой в вакууме.

Взаимодействие висячего и центрального скачков в пределах сверхзвукового участка течения может происходить с образованием двух результирующих ударных волн (см. фиг. 1, *в*, схема в правом верхнем углу).

При дальнейшем уменьшении нерасчетности возмущения уплотнения, вносимые висячим скачком, достигают оси струи. Начиная с нерасчетности n_* , которую назовем предельной, сжатый слой струи оказывает влияние на положение и форму всего центрального скачка и, следовательно, на течение перед преградой. Если при $n > n_*$ отход центрального скачка от преграды на оси струи равен отходу скачка при взаимодействии в вакууме и форма его искажается лишь с приближением к точке T , то при $n < n_*$ уменьшение нерасчетности непрерывно изменяет положение

ударных волн перед преградой. На формирование течения начинает существенно влиять вязкий слой смещения, развивающийся вдоль стационарного разрыва, исходящего из тройной точки.

3. В зависимости от сочетания параметров M, n, k, h при $n < n_*$ могут осуществляться следующие режимы течения между центральным скачком и преградой:

1) Устойчивое радиальное течение (фиг. 1, а). В этом случае максимум давления расположен в центре преграды, растекание газа (линия тока б) происходит от оси течения.

2) Сильно неустойчивое взаимодействие наступает при дальнейшем уменьшении нерасчетности, когда сжатый слой оказывает все большее влияние на приосевое течение. Ввиду того, что вблизи преграды течет газ с меньшим давлением торможения, чем газ, прошедший через всячий и отраженный скачки струи, становится возможным замыкание области вязкого перемешивания, исходящей из тройной точки, на преграду с образованием периферийной точки торможения. Замыкание центральной зоны течения приводит к накоплению в ней газа, смещению центрального скачка в сторону сопла, что ведет к повышению давления перед преградой с последующим размыканием этой зоны [3, 4]. Центральный скачок при этом колеблется с частотой, зависящей от диаметра сопла (например, при $d=20$ мм частота ~ 4 кГц). Такой автоколебательный неустойчивый режим можно рассматривать как переходный.

3) Течение с центральной циркуляционной зоной (фиг. 1, б), которое характеризуется периферийным максимумом давления на преграде и тремя точками торможения: в зоне вязкого присоединения к преграде слоя смещения, исходящего из тройной точки струи, в центре преграды и на оси течения между преградой и центральным скачком [5]. Вблизи оси течение на преграде направлено к центру. Наблюдаемая в экспериментах устойчивая картина течения колеблется с большой частотой.

4) Режим слабой неустойчивости является переходным к течению с невозмущенной первой бочкой при дальнейшем уменьшении нерасчетности. Он характеризуется большой частотой и меньшей амплитудой колебаний центрального скачка по сравнению с сильной неустойчивостью; максимум давления расположен на периферии.

5) Режим течения с невозмущенной первой бочкой возникает, когда при дальнейшем уменьшении нерасчетности центральный скачок уплотнения перед преградой располагается во второй бочке [6].

4. Взаимодействие струи, истекающей в вакуум, с безграничной плоскостью, расположенной перед точкой отражения B от оси первой характеристики веера разрежения, во многом аналогично рассмотренному в п. 1 (фиг. 1, в). Отличие состоит в том, что в данном случае центральный скачок может иметь двоякую кривизну — быть выпуклым к соплу в пределах области между осью и точкой B' и вогнутым вне ее (фиг. 1, в). Этот факт подтвержден экспериментально и теоретически [2, 6]. При этом интенсивность центрального скачка за характеристикой AB' возрастает с удалением от оси. Приведенные в п. 2 рассуждения о влиянии внешних возмущений на течение перед преградой справедливы и в рассматриваемом случае, однако такое влияние начинает проявляться при значительно меньших нерасчетностях. Механизм его несколько отличен от рассмотренного в п. 2, так как образующийся при $n < \infty$ всячий скачок уплотнения имеет вблизи сопла весьма малую интенсивность и центральный скачок непосредственно выходит на границу струи, которая и вносит возмущения в зону взаимодействия.

С целью исследования влияния нерасчетности на течение струи, взаимодействующей с преградой, установленной вблизи среза сопла ($h < l$,

где l — расстояние между срезом сопла и точкой B), было проведено экспериментальное исследование, в процессе которого положение центрального скачка перед преградой фиксировалось на шлирен-фотографиях при различных M , n и h . Таблица иллюстрирует диапазон изменения этих параметров в ходе эксперимента. Сопло с расчетным $M=2,9$ укороченное профилированное, все остальные сопла с $\theta > 0$ конические (θ — угол полураствора сопла); число M определялось по одномерной схеме.

M	1	1,5	2			2,2		2,9	3
θ	—	5°	5°	15°	25°	0°	5°	6°43'	5°
n	5—15,5	2,5—13,5	1,2—7,5			1,8—4,5		1—2	1,25—2,5
h	0,25—1	0,25—3	0,25—3	0,5—3		0,25—2		0,25—2,25	0,25—3

Фиг. 2 иллюстрирует влияние исследуемых параметров на расстояние x между соплом и центральным скачком для $M=2,0$; $k=1,4$.

Видно, что при малых h все экспериментальные результаты (при $n=2,5$ — кружки и $n=6,2$ — треугольники) группируются около одной кривой и не зависят от n в рассмотренном интервале. С увеличением h на положение центрального скачка перед преградой влияет нерасчетность. Прямая 1 изображает зависимость расстояния x от параметров истечения, полученную на основе приближенного решения [7], описывающего взаимодействие с преградой в вакууме течения от сферического источника, когда $h \gg r_*$ (здесь r_* — критический радиус источника)

$$(1) \quad x = \frac{1 + \sqrt{\frac{k-1}{2k} (m+4)}}{\frac{2k}{k+1} + \sqrt{\frac{k-1}{2k} (m+4)}} (h - h_*),$$

где $m = k(k-1)M^2$.

Величина h_* есть расстояние между соплом и преградой, когда центральный скачок касается кромки сопла [8].

Из фиг. 2 следует, что формула (1) может быть использована для определения зависимости x от h и M при $h < l$, когда x не зависит от n . Аналогичные результаты по расчету $x(h; M)$ при $h < l$ дает методика, изложенная в [9] (кривая 2). В случае, когда нерасчетность влияет на положение скачка перед преградой, для определения x может быть использована эмпирическая формула, приведенная в [10],

$$(2) \quad \frac{x}{C} = 0,745 - 0,83 \exp\left(-1,73 \frac{h}{C}\right),$$

где

$$(3) \quad C = M\sqrt{kn}$$

— геометрический параметр автомодельности. Анализ экспериментальных данных показал, что значение $h/C=0,35$ является нижним пределом применимости формулы (2). На фиг. 2 квадратиками обозначены точки, соответствующие значению $h/C=0,35$ для струй с $n=2,5$ и $n=6,2$. Кривые 3, 4 соответствуют расчету положения центрального скачка перед преградой по формуле (2).

Видно, что эта формула хорошо описывает экспериментальные результаты при $h/C \geq 0,35$. Применение формулы (2) при $h/C < 0,35$ противоречит результатам эксперимента, так как в этом случае x не зависит

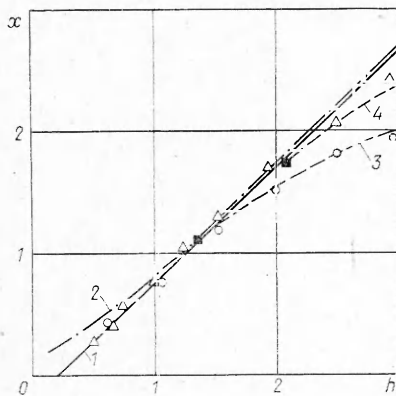
от n , а расчет по формуле (2) будет приводить к расслоению кривых $x(h)$ по нерасчетности.

Исходя из этого, будем считать, что при $h < 0,35C$ нерасчетность перестает влиять на положение скачка перед преградой, которое совпадает при этом с положением скачка при взаимодействии струи с преградой в вакууме.

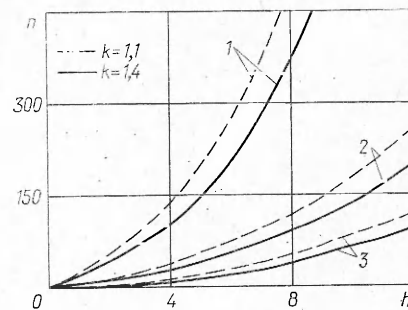
Согласно п. 2, нерасчетность, соответствующая значению $h=0,35C$, является предельной нерасчетностью. Учитывая соотношение (3), можно получить и формулу для ее определения

$$(4) \quad n_* = \frac{8,24}{k} \left(\frac{h}{M} \right)^2.$$

На фиг. 3 приведены данные, характеризующие влияние некоторых параметров истечения на значение предельной нерасчетности (кривые 1—3 для $M=1; 2; 3$ соответственно).



Ф и г. 2

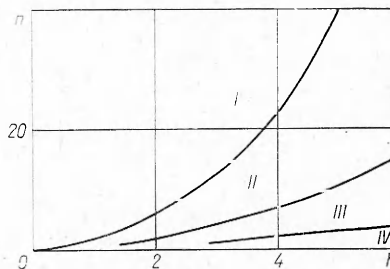


Ф и г. 3

При $h > l$, $n > n_*$ соотношения, приведенные в [7, 9] для определения отхода скачка от преграды, могут быть использованы непосредственно. При $n < n_*$ расстояние x определяется по формуле (2).

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить возможные типы волновой структуры, формирующейся перед безграничной плоской преградой при натекании на нее сверхзвуковой недорасширенной струи (см. фиг. 1). Предложенный критерий (4) в сочетании с эмпирическими зависимостями [10] для расчета границ режимов взаимодействия в случае $n < n_*$ позволяет определить типы течения при натекании струи на преграду. В качестве примера на фиг. 4 для струи с $M=2,0$; $k=1,4$ представлены области существования различных режимов взаимодействия в зависимости от n и h .

В области I отход центрального скачка уплотнения не зависит от нерасчетности. В области II течение в сжатом слое струи влияет на положение скачка перед преградой. Область III является переходной к течению с невозмущенной первой бочкой (область IV). Здесь реализуются неустойчивые



Ф и г. 4

режимы взаимодействия и течение с центральной циркуляционной зоной. Кривые, разграничивающие области I и III, III и IV, построены соответственно по эмпирическим формулам (1), (4), приведенным в [10].

Отмеченная выше качественная аналогия между взаимодействием струи с преградой в вакууме при $h > l$ и на близких расстояниях от сопла в случае ограниченной нерасчетности позволяет экстраполировать приведенные на фиг. 4 результаты на случай больших n .

Поступила 15 I 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев М. Г., Савинов К. Г. Удар неравномерного сверхзвукового потока газа в плоскую преграду.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1969, № 3.
2. Храмов Н. Е. Расчет взаимодействия осесимметричной сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1966, № 5.
3. Семилетенко Б. Г., Собколов Б. И., Усков В. Н. Особенности неустойчивого взаимодействия сверхзвуковых струй с безграничной преградой.— «Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук», 1972, вып. 3, № 13.
4. Голубков А. Г., Кузьменко Б. К., Остапенко В. А., Солотчин А. В. О взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской ограниченной преградой.— «Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук», 1972, вып. 3, № 13.
5. Гинзбург И. П., Семилетенко Б. Г., Терпигорьев В. С., Усков В. Н. Некоторые особенности взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой.— «Инж.-физ. журн.», 1970, т. XIX, № 3.
6. Гинзбург И. П., Семилетенко Б. Г., Усков В. Н. Экспериментальное исследование взаимодействия недорасширенной струи с плоской преградой, перпендикулярной оси струи.— «Учен. зап. Ленингр. ун-та. Сер. Газодинамика и теплообмен», 1973.
7. Roberts L. The action of hypersonic jet on a dust layer. IAS Paper 63-50, 1963.
8. Исаков А. Л., Погорелов В. И. Приближенный метод определения минимально допустимого расстояния между соплом и преградой.— «Изв. высш. учебн. заведений. Авиационная техника», 1968, № 3.
9. Благосклонов В. И. Приближенный метод расчета осесимметричного взаимодействия свободно расширяющейся струи с преградой.— «Учен. зап. ЦАГИ», 1970, т. 1, № 4.
10. Семилетенко Б. Г., Усков В. Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударных волн в струе, натекающей на преграду, перпендикулярную ее оси.— «Инж.-физ. журн.», 1972, т. XXIII, № 3.

УДК 532.526

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕУСТОЙЧИВОГО ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В СЖИМАЕМОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А. С. Дрыжов

(Новосибирск)

Эксперименты показывают [1], что переход ламинарной формы течения в турбулентную в пограничном слое происходит в результате образования и развития турбулентных пятен, возникающих, по-видимому, из малых естественных возмущений. Для изучения нелинейной эволюции и взаимодействия локализованных возмущений необходимо знать их характеристики в линейном приближении [2]. В данной работе приведены результаты вычислений таких характеристик для первых двух неустойчивых мод в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине ($M=4,5$; $T_w=4,44$).

В работе [3] рассматривалась задача о характере неустойчивости сжимаемого пограничного слоя. Анализ асимптотического ($t \rightarrow \infty$) поведения решения начальной задачи для возмущения, возникающего в ко-