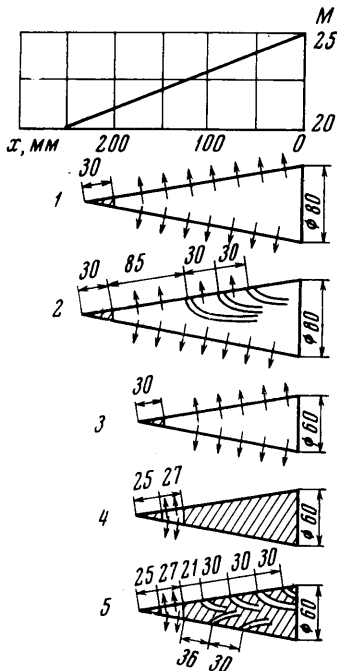


## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПОТОКА МАССЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНУСА В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

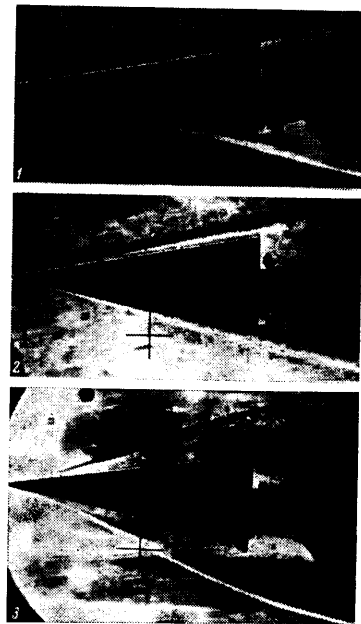
В. Н. ХАРЧЕНКО

(Москва)

В большинстве работ, посвященных исследованию влияния массобмена на течение около проницаемой поверхности, предполагается, что влияние поперечного потока массы ограничивается тонким пристенным пограничным слоем и не распространяется дальше его внешней границы. Однако при больших относительных расходах поперечного потока массы ( $m = \rho_w v_w / \rho_{\infty} v_{\infty}$ ) вследствие вытесняющего действия подводимого через проницаемую поверхность вещества увеличивается толщина «эффективного» тела, состоящего из твердого тела и слоя подводимого вещества, размеры которого



Фиг. 1



Фиг. 2

при больших  $m^\circ$  становятся соизмеримыми с размерами твердого тела. В связи с этим могут значительно измениться аэродинамические характеристики обтекаемого тела.

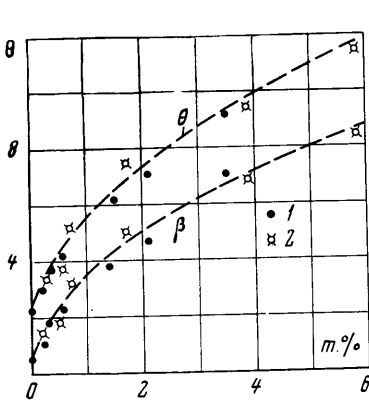
Ниже приведены результаты экспериментального исследования влияния интенсивного поперечного потока массы на обтекание конуса гиперзвуковым потоком. Вдвух осуществлялся через всю поверхность конуса или через часть поверхности вблизи вершины.

Эксперименты проведены в гелиевой трубе с коническим соплом при числе Маха  $M_\infty \approx 25$ , числе Рейнольдса, вычисленном по длине модели  $R \approx 10^6$ , температуре торможения  $T_0 \approx 300^\circ \text{K}$ . Модели представляли собой острые конусы с полууглом раскрытия  $10^\circ$ , проницаемые участки которых были изготовлены из пористого нихрома толщиной 1 мм. Было испытано пять моделей, размеры которых указаны на фиг. 1, там же приведено распределение чисел  $M_\infty$  по длине. Модели 1, 3 и 4 предназначены для весовых испытаний, на моделях 2 и 5 измерялось распределение давления. Вдуваемым газом был гелий с температурой, равной температуре торможения основного потока. Относительно режима течения в пограничном слое конуса в условиях опыта можно судить по данным работы [4], в которой приведены результаты исследований состояния пограничного слоя в широком диапазоне изменения чисел  $M$  и  $R$  в потоке гелия. По-видимому, в условиях описываемых опытов без вдува течение в погранич-

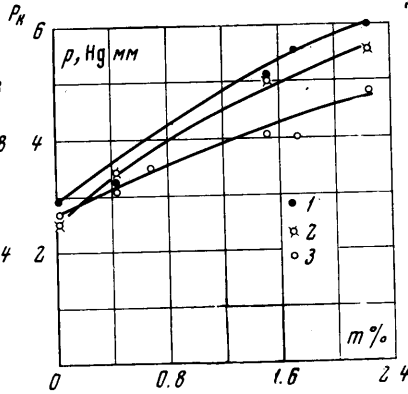
ном слое было ламинарным. Наличие поперечного потока массы могло турбулизировать течение, однако этот вопрос требует дополнительного исследования.

На фиг. 2 приведены тепловровские снимки картины течения во время испытаний с вдувом через всю поверхность конуса, за исключением короткого непроницаемого носика (снимки 1, 2, 3 сделаны при значениях  $m = 0, 0,5$  и  $6\%$  соответственно).

С увеличением интенсивности вдува толщина слоя вдуваемого газа между моделью и скачком уплотнения увеличивается и при максимальных расходах вдуваемого гелия становится соизмеримой с толщиной самого конуса. На фиг. 3 приведены данные о влиянии параметра  $m$  на увеличение угла полураствора эффективного конуса  $\beta$  точки 1 и 2 соответствуют конусам 1 и 3 (на этом и всех следующих графиках кривые приведены по экспериментальным точкам). Увеличение угла раствора эф-



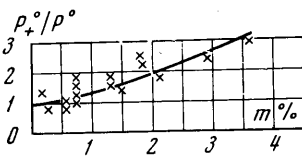
Фиг. 3



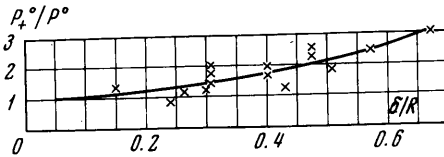
Фиг. 4

фективного конуса вызывает увеличение угла наклона скачка уплотнения к поверхности модели  $\theta$ ; эти данные приведены также на фиг. 3. При отсутствии вдува данные вполне удовлетворительно совпадают с расчетами В. Г. Буковшина и В. И. Шустова для невязкого обтекания острого конуса. Некоторое увеличение  $\theta$  по сравнению с расчетным объясняется наличием пограничного слоя на поверхности.

Как видно из тепловровских снимков при максимальных расходах вдуваемого газа, скачок уплотнения к концу модели искривляется. Заметным также становится ис-



Фиг. 5



Фиг. 6

кривление скачка у непроницаемого носика модели. Таким образом, на фиг. 3 приведены некоторые усредненные по длине модели величины.

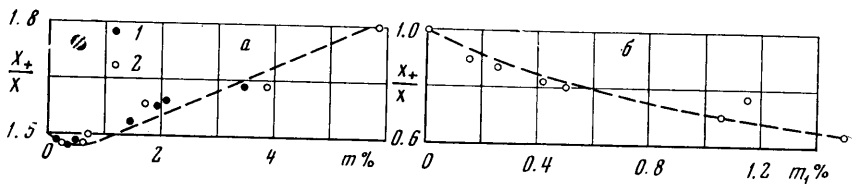
Увеличение угла полураствора эффективного тела приводит к увеличению давления на поверхности конуса. Измерение давления производилось в точках, расположенных на расстоянии 115, 145 и 175 мм от вершины (фиг. 4, точки 1, 2 и 3 соответственно). На этой фигуре приведены зависимости давления  $p_k$  в различных точках на поверхности конуса от параметра  $m$ . Из графиков видно, что с ростом интенсивности вдува увеличивается неравномерность распределения давления вдоль образующей конуса, т. е. нарушается коничность течения. Это подтверждается также тепловровскими снимками.

На фиг. 5 и 6 приведены результаты измерения донного давления при испытаниях модели 1. При отсутствии вдува результаты измерений ( $P^0$ ) удовлетворительно согласуются с данными работы [1]. Из графиков видно, что с увеличением массовой скорости вдува вследствие увеличения толщины слоя вдуваемого газа в сечении донного среза  $\delta$  (на фиг. 6 величина  $\delta$  отнесена к радиусу модели  $R$ ) донное давление  $p_+^0$  сильно возрастает. Следовательно, вдув охладителей через боковую поверхность приводит к снижению донного сопротивления тела.

Весовые испытания проводились на тензометрических весах. Вдуваемый газ подавался через гибкий резиновый шланг, расположенный в тени модели за донным срезом.

Перед основными испытаниями были проведены предварительные, в которых главное внимание было уделено выяснению влияния резинового шланга (вакуумная резина с наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 2 мм), подводящего гелий внутрь модели, на показания весов (шланг был закреплен таким образом, что имел петлю). На весах без потока были проведены испытания, в которых определялась реактивная сила вдуваемого газа и сила, обусловленная увеличением жесткости шланга, когда в нем находится газ под давлением, необходимым для осуществления вдува. Испытания в потоке без вдува проводились с присоединенным шлангом, в котором находился гелий при различных давлениях (отверстие на входе в модель при этом было заглушено).

Результаты предварительных испытаний конусов без вдува (с присоединенным шлангом и без него) совпали (с точностью до  $1 \div 2\%$ ) с имеющимися в литературоданными [1], а также с результатами испытаний сплошных конусов в этой же трубе.



Фиг. 7

На фиг. 7, *a* приведены весовые испытания моделей 1 и 3 (точки 1 и 2 соответственно). Полное сопротивление конуса  $X_+$  отнесено к сопротивлению  $X$  при отсутствии вдува. Из графика видно, что при небольших относительных расходах вдуваемого газа полное сопротивление конуса несколько падает. Это объясняется снижением сопротивления трения. При увеличении вдува вследствие утолщения эффективного конуса сопротивление его растет. При максимальных расходах вдуваемого газа увеличение полного сопротивления достигает 80% по сравнению с непроницаемым конусом.

Во многих реальных случаях подача газа должна осуществляться через головную часть тела. Испытания, проведенные с моделями 4 и 5, позволили исследовать влияние на сопротивление вдува гелия через пористый участок вблизи вершины остроуго конуса (исключить непроницаемую вершину конуса не удалось из-за технологических трудностей). Опыты, проведенные с размываемыми точками краски, нанесенными на поверхность, показали, что на всей поверхности конуса (до и после проникаемого участка) течение безотрывное.

На фиг. 8 приведены тепловские снимки обтекания модели 5 при различных величинах расхода вдуваемого газа (снимки 1, 2, 3, 4 сделаны при значениях  $G = 0, 0.2, 0.6$  и  $1.2$  г/сек соответственно). Из снимков видно, что вдув гелия даже через относительно небольшой пористый участок вблизи вершины приводит к существенным изменениям картины обтекания всего конуса. Слой вдуваемого газа имеет заметную толщину вдоль всей поверхности конуса. Скачок уплотнения с увеличением скорости вдува искривляется, и нарушается коничность течения. Это приводит к тому, что давление на поверхности конуса вдоль образующей не постоянно.

На фиг. 9 приведено распределение давления вдоль образующей конуса за пористым участком при расходах вдуваемого газа  $G = 0, 0.56, 0.67, 1.15$  г/сек (точки 2, 3, 4, 5 соответственно) и сравнение с расчетами В. Г. Буковшина и В. И. Шустова при  $G = 0$  (штриховая линия). Видно, что увеличение скорости вдува приводит к снижению давления на непроницаемом участке за пористой поверхностью. (Аналогичные результаты получены в работе [2].) Это можно объяснить некоторым уменьшением угла раствора эффективного конуса при вдуве газа через пористый участок вблизи вершины. Снимки на фиг. 8 подтверждают это предположение. При максимальных расходах вдуваемого газа скачок уплотнения вблизи донного среза почти параллелен образующей конуса. С ростом расхода вдуваемого газа увеличивается разница в величине давления в различных точках по длине образующей конуса. Это также можно объяснить уменьшением угла раствора эффективного конуса по его длине с увеличением количества подаваемого вблизи носка газа. При максимальных значениях расхода вдуваемого газа, имевших место в опытах, давление в конце конуса уменьшается в два раза по сравнению с данными для конуса при отсутствии вдува.

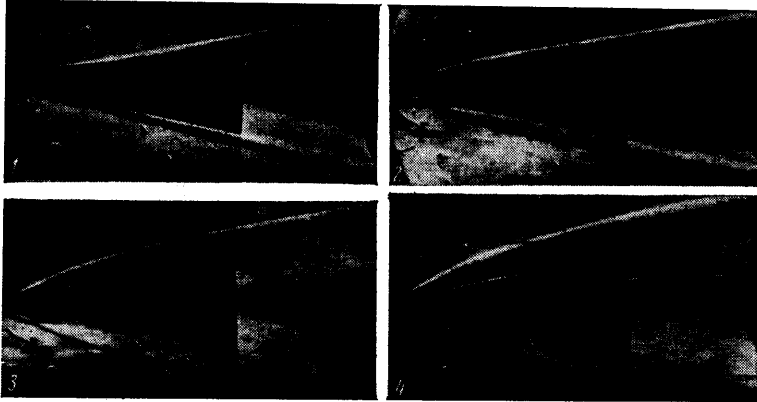
Хотя измерений донного давления при испытаниях модели 5 не производилось, можно предполагать, что донное давление в этих условиях должно уменьшаться с ро-

стом расхода. Это предположение основано на том, что толщина слоя вдуваемого газа в сечении донного среза увеличивается с ростом  $G$ , как и в случае вдува через всю поверхность конуса.

Результаты весовых испытаний модели 4 приведены на фиг. 7, б. Из графика видно, что полное сопротивление  $X_+$  конуса уменьшается с увеличением

$$m_1 = \frac{G}{g\rho_\infty u_\infty F}$$

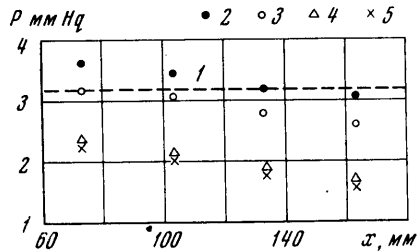
Здесь  $F$  — площадь сечения донного среза. Максимальное уменьшение сопротивления в опытах достигало 35%. Этому факту также можно дать объяснение, анализи-



Фиг. 8

руя тепловские снимки обтекания конуса, приведенные на фиг. 8. Подача большого количества газа через пористый участок вблизи вершины приводит к утолщению эффективного конуса вблизи вершины, но уменьшает угол раствора этого конуса на остальной его длине. Таким образом, сопротивление носовой части конуса увеличивается, но сопротивление остальной (большей по площади) части конуса уменьшается, что в сумме приводит к снижению полного сопротивления. Следовательно, подача газа через пористый носок приводит к тому, что эффективное тело принимает форму такого тела, сопротивление которого меньше, чем сопротивление непроницаемого конуса. О форме эффективного тела можно судить по форме скачка уплотнения. Анализ тепловских снимков (фиг. 8) показывает, что скачок уплотнения при больших значениях  $m$  имеет форму степенной кривой с показателем степени  $3/4$ . Известно, что сопротивление тел со степенной образующей ниже, чем сопротивление тела с прямолинейной образующей.

Автор благодарит Н. С. Курилкина за большую помощь при проведении экспериментов.



Фиг. 9

Поступило 12 V 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maddalon D. V., Henderson A. Boundary layer transition at hypersonic Mach number. AIAA Paper, No. 67-130.
2. Bogdonoff S. M. Research on hypersonic flows. Aeronaut. research labor. Princeton Univ., Princeton — New York, AD 651477.