

ки. При этом из (2.6) получаем

$$U = A \left\{ \int_{-\infty}^x e^{-vy^{1/2}A-1}(x-y) dy \left[ \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^y e^{-z^{1/2}A-1} dz dy \right]^{-1} - 1 \right\} \quad (3.4)$$

$$U' = A \int_{-\infty}^x e^{-vy^{1/2}A-1} dy \left[ \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^y e^{-z^{1/2}A-1} dz dy \right]^{-1} \quad (3.5)$$

Сравнивая знаменатели в (3.2) и (3.4), находим

$$\lim_{x \rightarrow 0} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{-z^{1/2}A-1} dz dy \left[ \int_{-\infty}^x e^{-vy^{1/2}A} dy \right]^{-1} = \begin{cases} -1 & (A \geq -2) \\ 2/A & (A < -2) \end{cases}$$

Откуда следует, что решения (3.2), (3.3) в точности совпадают с решениями (3.4), (3.5) во всей области, кроме точки  $x=0$ , при  $A < -2$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Whitehead J. A. Jr., Gershfeld N. Selective withdrawal from a rotating stratified current with applications to OTEC // Ocean Eng. 1981. V. 8. № 5. P. 507-515.
2. Griffiths R. W., Hopfinger E. J. Experiments with baroclinic vortex pairs in a rotating fluid // J. Fluid Mech. 1986. V. 173. P. 501-518.
3. Griffiths R. W., Hopfinger E. J. Coalescing of geostrophic vortices // J. Fluid Mech. 1987. V. 178. P. 73-97.
4. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 758 с.
5. Некрасов А. И. Диффузия вихря // Тр. ЦАГИ. 1931. Вып. 84. С. 1-32.
6. Розе Н. В., Кибель И. А., Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. Л.; М.: ОНТИ, 1937. 506 с.

Москва

Поступила в редакцию  
11.VI.1990

УДК 532.526 : 537.84

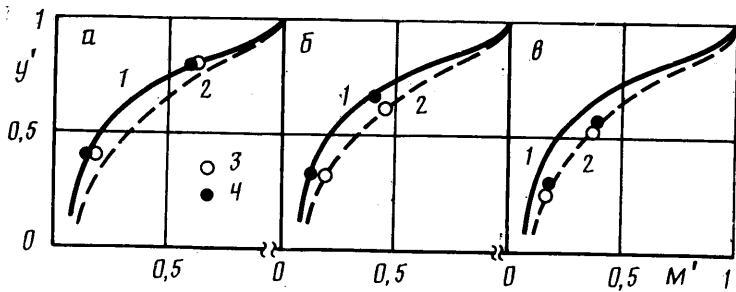
© 1991 г.

В. Я. КИСЕЛЕВ, В. И. ЛЫСЕНКО

### ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЕРЕХОД ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

При больших скоростях обтекания тел в связи со значительным повышением температуры торможения происходит диссоциация газов, а затем их ионизация. Наложение магнитного поля (как внешнего, так и излучаемого самим летательным аппаратом) на течение ионизованного, т. е. электропроводящего, газа может повлечь изменение положения перехода ламинарного пограничного слоя на обтекаемом теле в турбулентный. В данной работе экспериментально исследуется влияние продольного поля на переход высокоскоростного пограничного слоя.

Такое влияние подробно исследовано для несжимаемой жидкости и результаты этих исследований достаточно хорошо согласуются между собой. Во многих работах (например, [1-3]) получено, что продольное (направленное вдоль потока) магнитное поле подавляет возмущения в течении электропроводящей жидкости (в частности, в пограничном слое). При такой направленности магнитного поля энергия поперечных флуктуаций приводит к появлению микротоков и тормозящих эти флуктуации поперечных сил [1]. С помощью продольного магнитного поля можно добиться перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный, а при определенных условиях можно полностью подавить турбулентность в потоке [2]. Особенность течения в продольном магнитном поле состоит в том, что среднее течение несущественно взаимодействует с магнитным полем, и эффект воздействия поля на турбулентность про-



является в «чистом» виде [3]. В некоторых работах (например, [4]) показано, что под влиянием продольного магнитного поля несколько повышается устойчивость течения, увеличивается критическое число Рейнольдса, а интервал неустойчивых волновых чисел уменьшается. В ряде работ получено, что воздействие продольного магнитного поля ведет к увеличению числа Рейнольдса начала перехода от ламинарного к турбулентному течению.

Влияние магнитного поля, направленного вдоль набегающего потока, на переход пограничного слоя сказывается главным образом через два механизма — из-за поперечных перетеканий жидкости в пограничном слое и из-за уменьшения амплитуды возмущений. Для несжимаемой жидкости вывод однозначен — продольное магнитное поле стабилизирует течение в пограничном слое, а вот для случая гиперзвуковых скоростей необходимо было провести соответствующие эксперименты, ибо если в [5] при увеличении числа Маха стабилизирующий эффект продольного магнитного поля на течение идеально проводящей невязкой сжимаемой жидкости уменьшался, то расчеты в [6] показали, что при воздействии магнитного поля на течение невязкой сжимаемой проводящей жидкости в канале высокоскоростной поток ведет себя аналогично несжимаемой жидкости. Выяснению этого вопроса и посвящена данная работа.

Эксперименты были проведены в азотной трубе Т-327А ИТПМ СО АН СССР при числе Маха  $M_\infty \approx 21$ , единичном числе Рейнольдса  $(Re)_1 \approx 0,25 \cdot 10^6$  1/м, температуре торможения в форкамере  $T_0 \approx 2000$  К (максимальная  $T_0 = 2200$  К) и давления в форкамере  $(7,7-7,8) \cdot 10^6$  Па. Для увеличения степени ионизации газа использовались легкоионизируемые (потенциал ионизации 5,98 эВ) добавки алюминия. Продольное магнитное поле создавалось с помощью соленоида с током в электрообмотках до 1200 А. Магнитная индукция этого поля была  $B \approx 0,3$  Тл. При этом  $V \parallel -U$ . Охлажденные электрообмотки — водяные.

Рабочая модель представляла собой полированную плоскую пластину длиной 330 мм и толщиной 8 мм, имеющую форму трапеции (ширина носика 62 мм, а задней кромки — 32 мм). Угол скоса передней кромки  $7^\circ$ , ее притупление — 0,1 мм. Материал пластины — нержавеющая (немагнитная) сталь X18Н9Т. Модель выставлялась под нулевым углом атаки. На пластине на расстоянии 60 мм от передней кромки на всю ширину модели был выфрезерован паз, в который поочередно вставлялись выступы разной высоты (толщиной 3 мм). Выступы имели высоту  $h$  от 0 до 15 мм.

Для фиксации положения перехода пограничного слоя служил тензометрический датчик полного напора (на базе датчика фирмы «KYOWA Electronic Instruments CO LTD» типа PG-10GC) с диаметром приемного отверстия 2 мм. Сигнал от датчика регистрировался вольтметром универсальным цифровым В7-23 с принтером. Погрешность измерений датчика была  $\pm 3$  Па.

Положение перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на модели фиксировалось по распределению полного давления вдоль ее поверхности на расстоянии  $y=20$  и 10 мм от нее (при нормальной координате  $y \sim 0$  величина полного напора была меньше погрешности измерений датчика).

Измерения были проведены при трех значениях продольной координаты  $x=300$ , 250 и 200 мм. Положение перехода на модели определялось как при наличии продольного магнитного поля, так и при его отсутствии. Результаты измерений для  $h=15$  мм приведены на фигуре в виде безразмерных профилей числа Маха:  $y' = y/\delta$ ,  $M' = M/M_\infty$ , где  $\delta$  — толщина пограничного слоя. Сплошная кривая 1 и пунктирная 2 — это усредненные экспериментальные данные для ламинарного и турбулентного пограничного слоя (получены по показаниям датчика полного напора при предположении постоянства статического давления поперек пограничного слоя). Эти экспериментальные кривые хорошо коррелируют с аналогичными расчетными зависимостями, полученными М. И. Мучной. Точки 3 относятся к измерениям без воздействия магнитного поля, 4 — соответствуют измерениям при наличии продольного магнитного поля. Зависимости а, б и в соответствуют  $x=200$ , 250 и 300 мм.

Как видно из фигуры, и для высокоскоростного электропроводящего пограничного слоя воздействие продольного магнитного поля ведет к увеличению числа Рей-

нольдса перехода, что, видимо, вызывается в первую очередь подавлением возмущений в пограничном слое магнитным полем.

Дополнительно была проведена небольшая серия экспериментов по влиянию на переход пограничного слоя поперечного магнитного поля, создаваемого двумя катушками Гельмгольца. Получено, что трансверсальное магнитное поле, приводящее к силе Лоренца, направленной от границы пограничного слоя к поверхности модели, оказывает дестабилизирующее влияние на положение перехода на пластине с выступом — число Рейнольдса перехода уменьшается. С точки зрения авторов, это происходит либо из-за возрастания неустойчивости второй моды возмущений при уменьшении толщины пограничного слоя, либо за счет увеличения относительной высоты турбулизатора  $h/\delta$ , либо из-за воздействия этих двух факторов одновременно. Впрочем, так как величина  $B_z$  была лишь 0,1 Тл, то эффект воздействия трансверсального магнитного поля лишь немногим превышал погрешность измерений датчика.

Итак, в проведенных экспериментах получено, что продольное магнитное поле оказывает стабилизирующее воздействие на высокоскоростной электропроводящий пограничный слой — число Рейнольдса перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный увеличивается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Narasimha R.* Relaminarization — magnetohydrodynamic and otherwise // *Liquid-Metal Flows and Magnetohydrodyn. 3-rd Int. Semin. MHD Flows and Turbulence Ser. Negev.*, 1981. N. Y., 1983. P. 30–52.
2. *Красильников Е. Ю., Луцик В. Г., Николаенко В. С. и др.* Экспериментальное исследование пульсационных характеристик турбулентного течения проводящей жидкости в трубе в продольном магнитном поле // *Докл. АН СССР*. 1975. Т. 225. № 6. С. 1281–1283.
3. *Луцик В. Г., Якубенко А. Е.* Трехпараметрическая модель турбулентности: расчет течения в продольном магнитном поле // *Магнит. гидродинамика*. 1987. № 3. С. 30–38.
4. *Генчев Ж. Д.* Влияние продольного магнитного поля на устойчивость течения плохо проводящей плазмы в бесконечной круглой идеально проводящей трубе // *Магнит. гидродинамика*. 1977. № 4. С. 3–10.
5. *Jindia R. K., Chakraborty B. B.* Hydromagnetic stability of a vortex sheet in compressible, perfectly conducting fluids // *Indian J. Pure and Appl. Math.* 1979. V. 10. № 10. P. 1236–1248.
6. *Xuequan E.* Hypersonic flow behavior in magnetohydrodynamic channel // *Лисью сюэбао. Acta mech. sin.* 1983. № 2. P. 134–143 (кит.).

Новосибирск

Поступила в редакцию  
18.IV.1990

УДК 532.526.5:533.6.011.5

© 1991 г.

А. И. ЗУБКОВ, Б. Е. ЛЯГУШИН, Ю. А. ПАНОВ

#### КОНУС В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ С ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

Имеющиеся в литературе сведения о взаимодействии падающих скачков уплотнения с турбулентным пограничным слоем относятся к случаям, когда на плоской поверхности имелся тонкий пограничный слой ( $\delta \approx 1-3$  мм). В настоящей работе приведены результаты исследований обтекания сверхзвуковым потоком с числом  $M=3$  и давлением торможения  $p_0=1,2$  МПа конусов, расположенных вблизи поверхности с толстым турбулентным слоем, который образовывался на пластине, пристыкованной к нижней кромке плоского сопла.

Толщина пограничного слоя, равная в месте падения конического скачка уплотнения  $\delta=13,5$  мм, была определена по результатам измерения насадком полного давления поперек слоя. Конусы с углами  $\alpha=20-90^\circ$  и диаметром основания  $d=50$  и 70 мм крепились на задней державке на координатнике так, что их ось совпадала с направлением набегающего потока. За высоту конуса  $h$  над поверхностью принято расстояние его оси от поверхности пластины. Отношение  $h/d$  изменялось от 0,5 до 1,0. Пластина была дренирована вдоль лучей длиной 30 мм, исходящих с интервалом в  $30^\circ$  из центра, расположенного на линии симметрии на расстоянии 140 мм от переднего края пластины. Расположение конуса подбиралось