

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НА ОТТЕСНЕНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ВДУВЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ПЛАСТИНУ

Сахнов А.Ю.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Известно [1], что при однородном вдуве газа в пристенное течение в условиях постоянного потока вещества $\bar{j}_w(x) = \text{const}$ оттеснение пограничного слоя наступает при $\bar{j}_w \sqrt{\text{Re}_x} = 0.86$, где $\bar{j}_w = V_w / U_e$ и $\text{Re}_x = U_e x / \nu$. При этом коэффициент трения становится равным нулю.

Для условий совместного воздействия отрицательного градиента давления и пористой стенки в работе [2] представлено аналитическое решение уравнения движения, из которого следует, что коэффициент трения в асимптотической области течения можно определить по следующей формуле:

$$\frac{c_f}{2} = \frac{c\sqrt{2K} \cdot \text{erfc}(-c\Psi_{aw})}{2c^2\Psi_{aw} \text{erfc}(-c\Psi_{aw}) + \exp(-c^2\Psi_{aw}^2)}, \quad (1)$$

где $c = \sqrt{\pi}/2$, $\Psi_{aw} = \bar{j}_w / \sqrt{K\pi/2}$ - относительная асимптотическая функция трения, $K = \nu / U_e^2 (dU_e / dx)$ - параметр ускорения потока.

Можно показать, что при $\Psi_{aw} \rightarrow \infty$, т.е. при очень большом вдуве или при очень малом ускорении потока, коэффициент трения стремится к нулю. Другими словами, наступает оттеснение пограничного слоя.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования уравнений ламинарного пограничного слоя при одновременном воздействии отрицательного градиента давления и вдува воздуха через обтекаемую поверхность. Рассматривалось течение воздуха в области нижнего пограничного слоя плоского сужающегося канала, в котором параметр ускорения K сохраняет постоянное значение по всей длине канала (см. рис. 1). Предполагалось, что верхняя наклонная стенка канала располагается достаточно далеко от нижней поверхности канала, так что $h_0 \gg \delta$.

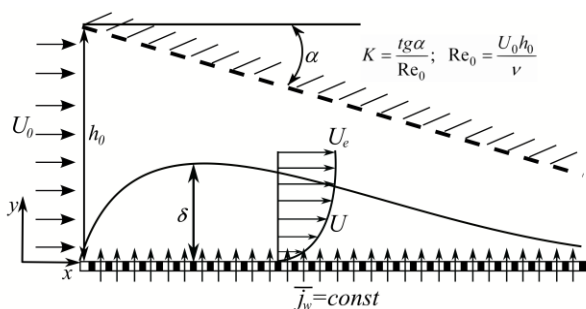


Рис. 1. Схема течения

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса при $\bar{j}_w = 10^{-2}$ и различных значениях параметра ускорения K . В случае безградиентного течения $K = 0$ вдув газа приводит к

оттеснению пограничного слоя при $\text{Re}_x \approx 7500$, что согласуется с условием $\bar{j}_w \sqrt{\text{Re}_x} = 0.86$.

Однако при появлении достаточно слабого отрицательного градиента давления со значением $K = 10^{-7}$, коэффициент трения, хотя и становится малым $c_f/2 = 10^{-5}$, но не обращается в нуль. Более того, реализуется режим асимптотического течения [3], когда коэффициент трения не зависит от числа Рейнольдса, рассчитанного по продольной координате. При этом значения c_f можно определить по формуле (1).

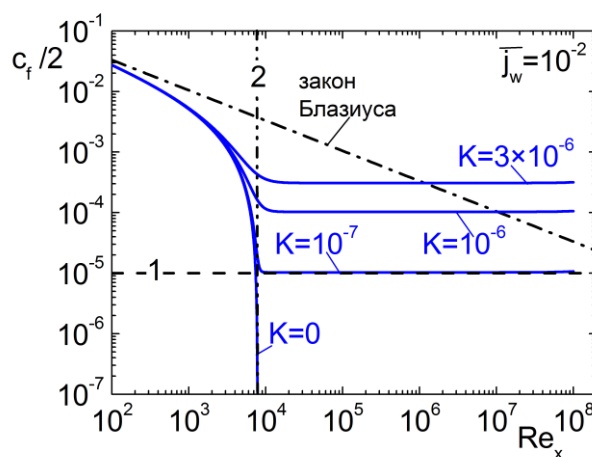


Рис. 2. Совместное воздействие отрицательного градиента давления и вдува газа на коэффициент трения.

1 - формула (1), 2 - точка оттеснения пограничного слоя при вдуве $\bar{j}_w \sqrt{\text{Re}_x} = 0.86$ [1].

Как видно, с увеличением параметра ускорения K коэффициент трения растёт практически не изменяется до $\text{Re}_x \approx 7500$ и возрастает при больших числах Рейнольдса. Можно заметить, что во всех случаях коэффициент трения остаётся постоянным при $\bar{j}_w \sqrt{\text{Re}_x} > 0.86$. Таким образом, данное условие начала оттеснения пограничного слоя следует использовать для определения границы асимптотической области при совместном воздействии отрицательного градиента давления и вдува газа через пористую поверхность.

На рис. 3 приведены профили продольной скорости для $\bar{j}_w = 10^{-2}$ и $K = 10^{-7}$ при различных числах Рейнольдса. При $\text{Re}_x = 10^3$ расчётный профиль практически совпадает с профилем Блазиуса [4]. Далее с ростом числа Рейнольдса профили становятся менее заполненными и в точке возможного оттеснения при $\text{Re}_x = 7.5 \times 10^3$ производная на стенке практически равна нулю.

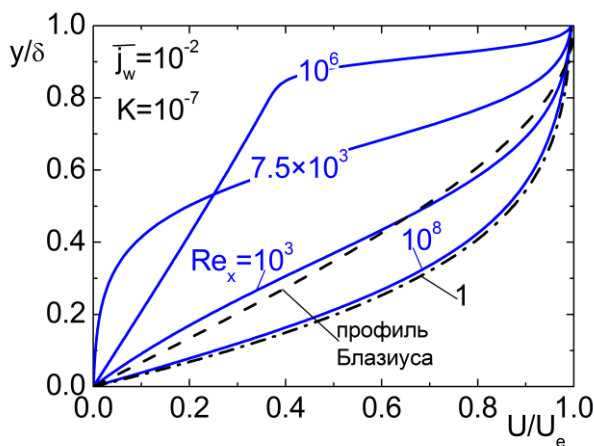


Рис. 3. Профили продольной скорости при одновременном влиянии ускорении и вдуве газа в пограничный слой. 1 – профиль продольной скорости при асимптотическом отрицательном градиенте давления на непроницаемой стенке [3], формула (2).

Под воздействием отрицательного градиента давления пограничный слой не оттесняется от стенки, и профили становятся более заполненными. При этом, например, при $Re_x = 10^6$ в распределении продольной скорости существует линейный участок. При $Re_x = 10^8$ распределение продольной скорости соответствует профилю скорости при $K Re_x > 1$ в условиях ускоренного потока на непроницаемой стенке [3], который определяется следующей формулой:

$$\frac{U}{U_e} = 1 - e^{-\frac{K}{2} Re_y^2} + Re_y \sqrt{\frac{K}{2}} \pi \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{K}{2}} Re_y \right), \quad (2)$$

где $Re_y = \frac{U_e y}{\nu}$.

На рис. 4 представлены профили поперечной скорости для тех же параметров, что и профили продольной скорости. На стенке для всех чисел Рейнольдса поперечная скорость равна интенсивности вдува. При этом в остальной области пограничного слоя поперечная скорость возрастает до возможной точки оттеснения при $Re_x = 7.5 \times 10^3$.

Далее поперечная скорость снижается $Re_x = 10^6$, постепенно принимает линейный характер распределения и становится отрицательной при $Re_x = 10^8$, что соответствует асимптотическому характеру течения [3].

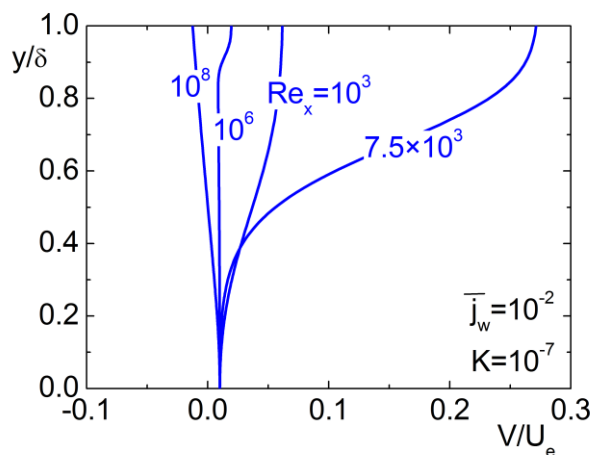


Рис. 4. Профили поперечной скорости при одновременном влиянии ускорении и вдуве газа в пограничный слой.

Таким образом, отрицательный градиент давления препятствует оттеснению пограничного слоя при вдуве газа через пористую поверхность. Направленная к стенке поперечная скорость, являющаяся следствием ускорения основного течения, противодействует вдуву газа. При этом коэффициент трения остаётся на достаточно низком уровне.

Список литературы:

1. Ерошенко В.М., Зайчик Л.И. Гидродинамика и тепломассообмен на проницаемых поверхностях / М.: Наука, 1984. с. 274
2. А.Ю. Сахнов, Аналитическое решение уравнений ламинарного пограничного слоя в условиях асимптотического отрицательного градиента давления и проницаемой стенки // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Доклады IX Всероссийской конференции молодых учёных / Под. ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2012, с. 240 – 243.
3. E.P. Volchkov, M.S. Makarov, A. Yu. Sakhnov, Boundary layer with asymptotic favourable pressure gradient // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. P. 2837 – 2843.
4. Schlichting H., Gersten K., Boundary Layer Theory // 8th ed. Springer: Berlin. – 2003.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант № 14-08-31115 мол_а