

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Ю. С. ЛЕВИТАН, Е. В. МУРАВЬЕВ, И. Г. ПАНЕВИН

(Москва)

Представлены экспериментальные результаты модельного исследования структуры трехмерного пограничного слоя на токопроводящей поверхности при наличии боковых составляющих скорости и объемной тормозящей силы.

В качестве модели использовано течение воды вдоль вертикальной пластины.

Результаты подтвердили полученный ранее теоретически вывод об отсутствии отрыва пространственного пограничного слоя при сильном торможении боковой составляющей скорости вплоть до образования обратного бокового течения при условии независимости параметров потока от боковой координаты.

1. В работе [1] теоретически исследовано развитие пространственного пограничного слоя применительно к течению проводящей жидкости с закруткой в цилиндрическом магнитогидродинамическом канале с коаксиальными электродами в продольном магнитном поле. При таких условиях в канале возникает объемная сила, тормозящая (или ускоряющая) боковое течение. В результате возникает расслоение потока, т. е. струйки жидкости вблизи стенки и во внешнем течении двигаются под углом друг к другу. Аналогичный эффект проявляется при косом обтекании крыла, в криволинейных каналах и в различного рода осесимметричных каналах с вращающимися боковыми стенками или с закрученными потоками возле торцовых стенок [2].

В случае торможения боковой составляющей скорости в пограничном слое на электродах должно наблюдаться характерное перестроение профилей скорости вплоть до сечения, в котором $w'(0)=0$, где w' — производная боковой составляющей скорости по поперечной координате y . Такое перестроение профиля боковой скорости аналогично перестроению профиля продольной скорости в прямом течении с торможением.

В последнем случае, как известно, при обращении напряжения трения на стенке в нуль ($\tau_w=0$) обычно возникает отрыв пограничного слоя. Для рассматриваемого пространственного пограничного слоя вопрос об условиях отрыва недостаточно ясен.

Экспериментальные данные показывают, что в трехмерном пограничном слое может происходить отрыв при $\tau_w=0$ [3]. В [4] предложено необходимое условие отрыва пограничного слоя, которое записывается в виде

$$(1.1) \quad \tau_w \cdot \text{grad } p = 0, \quad \mathbf{V} \cdot \text{grad } p > 0$$

где \mathbf{V} — скорость внешнего течения.

2. При расчете двухмерного магнитогидродинамического пограничного слоя на электродах градиент давления и лоренцеву силу заменяют одной суммарной объемной силой [3]. Далее расчет проводится так же, как в гидродинамике непроводящих сред. В частности, для определения точки отрыва используется условие $\tau_w=0$. Этот же прием применим и для пространственного магнитогидродинамического пограничного слоя. В случае закрученного потока в МГД канале с коаксиальными электродами при торможении боковой скорости в результате взаимодействия с продольным полем величина w' будет стремиться к нулю на стенке. При этом в некотором сечении канала должно реализоваться условие (1.1) с учетом вышесказанного

$$(2.1) \quad \tau_w \cdot \mathbf{F} = 0, \quad \mathbf{V} \cdot \mathbf{F} < 0, \quad \mathbf{F} = \text{grad } p + \mathbf{f}.$$

Здесь \mathbf{f} — лоренцева сила.

Будем полагать, что для любого пространственного течения факт отрыва пограничного слоя можно определить по двум существенным признакам [5]: возрастанию поперечной скорости в пограничном слое до величины порядка полной скорости и резкому увеличению толщины пограничного слоя (точнее, толщины вытеснения или расстояния от стенки до области внешнего течения, поскольку после отрыва пограничный слой как таковой перестанет существовать). Последний параметр можно получить из экспериментально измеренных профилей скорости.

3. Рассмотрим, как и в [1], упрощенный вариант магнитогидродинамического течения вязкой жидкости вдоль плоской проводящей поверхности при наличии боковой скорости w и объемной тормозящей силы $j_y B_x$, причем $\partial/\partial z = 0$. Тогда система безразмерных уравнений неразрывности и импульсов для турбулентного течения

может быть представлена в следующем виде:

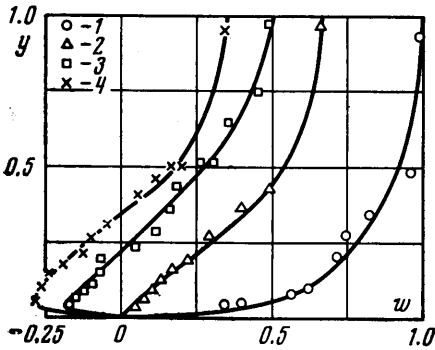
$$(3.1) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial \langle u'v' \rangle}{\partial y}$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial \langle w'v' \rangle}{\partial y} - N$$

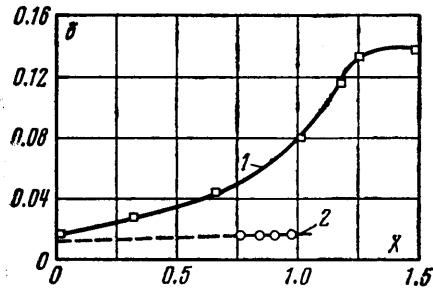
$$N = S \operatorname{tg} \alpha_\infty, \quad S = j_y B_x L / (\rho W_\infty), \quad \operatorname{tg} \alpha_\infty = W_\infty / U_\infty$$

Здесь S — параметр МГД взаимодействия; α_∞ — угол скоса потока в пачальном сечении.

В случае $S = \text{const}$ для рассматриваемого МГД течения существует простая аналогия с течением вязкой жидкости вдоль неограниченной вертикальной пластины. В этом случае $N = \operatorname{tg} \alpha_\infty / \operatorname{Fr}$, где $\operatorname{Fr} = W_\infty^2 / (gL) = \text{const}$ — число Фруда.



Фиг. 1



Фиг. 2

В данной модели воспроизведены две наиболее важные особенности задачи: независимость параметров течения от боковой координаты и наличие неизменной по толщине пограничного слоя боковой тормозящей объемной силы.

При выполнении этих условий на линии, где $w'(0) = 0$ должно выполняться условие (2.4), т. е. следует ожидать отрыв.

4. Измерение профилей суммарной скорости и угла скоса потока по толщине пограничного слоя на водяной модели производилось в четырех сечениях в окрестности линии $y = 0$, $x = \text{const}$, на которой реализуется условие $w'(0) = 0$.

Профили боковой скорости, полученные по результатам измерений суммарной скорости и угла скоса потока, представлены на фиг. 1. Здесь цифрами 1–4 обозначены точки, относящиеся к каждому из четырех рабочих сечений; y — относительная толщина пограничного слоя; W — боковая составляющая скорости, отнесенная к ее максимальному значению, в ядре потока в первом рабочем сечении.

Для решения вопроса об отрыве полученные характерные толщины пограничного слоя были подвергнуты сравнению с соответствующими результатами исследований прямых отрывных течений [6] (фиг. 2). По оси абсцисс отложены продольные расстояния точек измерений от входного устройства, отнесенные к «длине отрыва» L^* , т. е. к расстоянию до точки, в которой $u'(0) = 0$ в [6] или $w'(0) = 0$ в данном эксперименте.

Таким образом, $X = x/L^* = 1$ соответствует точке отрыва в прямом течении. По оси ординат отложены толщины пограничных слоев, определенные из условия $u/U_\infty = 0.95$ и выраженные в том же масштабе, что и продольное расстояние. Видно, что в прямом течении в районе точки отрыва толщина пограничного слоя резко возрастает (кривая 1), и расстояние от стенки до невозмущенного внешнего потока за точкой отрыва ($X > 1$) почти на порядок больше толщины пограничного слоя на входе в рабочий канал. В то же время результаты данного эксперимента показывают, что затормаживание боковой составляющей скорости и образование обратного бокового течения в пограничном слое не оказывают заметного влияния на толщину пограничного слоя (кривая 2), которая при переходе через точку $w'(0) = 0$ практически не меняется с точностью до ошибки измерений.

Таким образом, результаты эксперимента свидетельствуют в пользу вывода об отсутствии отрыва пространственного пограничного слоя при сильном торможении

боковой составляющей скорости, в том числе с образованием обратного бокового течения, при условии независимости параметров потока от боковой координаты.

Поступила 4 III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Т. Д., Левитан Ю. С., Муравьев Е. В., Паневин И. Г. Ламинарный магнитогидродинамический пограничный слой на токопроводящей поверхности при наличии боковых составляющей скорости и объемной тормозящей силы. *Магнитная гидродинамика*, 1971, вып. 4, стр. 36–42.
2. Schlichting H. Three-dimensional boundary layer flow. DFL-Bericht, 1971, No. 195. (Рус. перев.: Трехмерные пограничные слои. Сб. «Механика», 1964, № 3 (85).)
3. Вагажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М., «Наука», 1970.
4. Бам-Зеликович Г. М. О необходимом условии отрыва трехмерного пограничного слоя. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 2.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 195.
6. Little B. H., Wilbur S. W. Performance and boundary layer data from 12° and 23° conical diffusers of area ratio 2.0 at Mach numbers up to choking and Reynolds numbers up to 7,5·10⁸. NACA Rept No. 1201, 1954.

УДК 532.526.2

ЛАМИНАРНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ В СЛАБЫХ РАСТВОРАХ ПОЛИМЕРОВ

В. В. ДРОБЛЕНКОВ, Г. И. КАНЕВСКИЙ

(Ленинград)

В статье излагаются результаты исследования уравнений ламинарного пограничного слоя и его устойчивости в слабых растворах полимеров. В качестве математической модели, описывающей свойства течений растворов полимеров, используется реологическая модель, в которой учитывается временная связь между тензором напряжений и тензором скоростей деформаций [1]. Анализ этих уравнений показывает, что релаксационные свойства жидкости в большей мере влияют на устойчивость течения. Проведенные расчеты показывают увеличение устойчивости профиля скорости в пограничном слое, а также изменение характера распределения реинольдсовых напряжений при учете релаксационных свойств жидкости.

С учетом релаксационных свойств уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в пренебрежении массовыми силами приобретают вид [1].

$$(1) \quad \frac{d\bar{V}}{dT} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P + \nu \Delta \bar{V} + \frac{k}{\rho} \frac{d}{dT} (\Delta \bar{V}), \quad \text{div } \bar{V} = 0$$

Здесь T — время, k — релаксационная вязкость, остальные обозначения общеприняты.

Предположим, что при введении в жидкость малых добавок полимеров остаются справедливыми основные концепции теории пограничного слоя. Тогда величина толщины пограничного слоя δ может быть оценена следующим образом: $\delta \sim \sqrt{\nu}$ и $\delta \ll L$, где L — характерный линейный размер тела.

Произведем обычные оценки в уравнениях движения (1) для случая течения в плоском пограничном слое [2]. Отношение релаксационных членов к инерционным будет характеризовать число релаксации $R_x = k/\rho L^2$.

Проведенные оценки показывают, что величина членов, зависящих от релаксационных свойств жидкости, имеет в пограничном слое одинаковый порядок с инерционными членами и членами, зависящими от обычной вязкости, только при условии

$$(2) \quad k/\rho \infty \delta^2$$