

УДК 532.526

ОБТЕКАНИЕ ОБРАТНЫХ СТУПЕНЕК С КАВЕРНОЙ

Е. С. Каменецкий

Численными расчетами с использованием простой модели турбулентности показано, что размеры области отрыва за обратной ступенькой растут при наличии каверны непосредственно за ступенькой. С уменьшением ширины каверны размеры отрывной области увеличиваются до тех пор пока в каверне не образуется отдельный вихрь.

Обтеканию обратных ступенек турбулентным потоком посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. При этом после ступеньки стенка всегда предполагалась горизонтальной. Представляет интерес оценка влияния каверны, расположенной непосредственно за ступенькой, на картину течения. Такая конфигурация моделирует течение в уличном каньоне если дома на наветренной стороне улицы имеют меньшую высоту, а также может встретиться в различных инженерных задачах.

Для расчета поля скорости жидкости за ступенькой решались уравнения в переменных вихрь ω — функция тока ψ для стационарного случая [1]

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{kl} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{kl} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right),$$

$$\omega = - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right)$$

со следующими граничными условиями: на входной границе скорость жидкости принималась практически постоянной с небольшим пограничным слоем вблизи обтекаемой поверхности. Значения функции тока и завихренности на этой границе определялись по скорости жидкости причем предполагалось, что производные по координате x , направленной по нормали к этой границе, равны нулю. На обтекаемой поверхности функция тока принималась равной нулю, а завихренность в соответствии с рекомендациями работы [2] рассчитывалась по формуле

$$\omega = \frac{\partial \psi}{\partial n},$$

где n — нормаль к обтекаемой поверхности.

На выходной границе расчетной области в начале расчета ставились такие же граничные условия как и на входной, а после того, как картина течения устанавливалась, принимались равными нулю первые производные от соответствующих величин по нормали к границе. Верхняя граница расчетной области выбиралась на высоте от двух до примерно семи высот ступеньки. На этой границе задавалось постоянное значение функции тока, а завихренность отсутствовала.

Предполагалось, что порождение кинетической энергии турбулентности k в каждой точке потока равно ее диссипации:

$$k = \frac{l^2}{C_d} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right).$$

Масштаб турбулентности l считался пропорциональным расстоянию от рассматриваемой точки в потоке до ближайшей точки стенки, а вдали от стенки этот масштаб принимался постоянным и равным l_0 :

$$l = \frac{l_0 C_d^{1/4} \kappa l_{min}}{C_d^{1/4} \kappa l_{min} + l_0}.$$

Здесь κ — постоянная Кармана, а C_d — константа в выражении для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности.

Уравнение для определения завихренности решалось методом установления с использованием конечноразностной схемы «классики» [2]. Для того, чтобы избежать схемной диффузии, в членах, описывающих конвективный перенос завихренности, производные аппроксимировались конечными разностями первого порядка в направлении против скорости потока. Для получения более гладкого решения результаты полученные на двух последующих временных слоях в каждой точке осреднялись. Уравнение Пуассона для функции тока решалось методом последовательной верхней релаксации.

Для тестирования модели и метода решения проводились расчеты обтекания обратных ступенек без каверны. Эти расчеты показали, что для ступеньки, высота которой порядка двух толщин пограничного слоя над ней, размеры области отрыва определяются достаточно точно. С уменьшением высоты ступеньки размеры области отрыва уменьшаются. Расчетный профиль осредненной скорости близок к результатам экспериментов, приведенным в работе [3], отличаясь большими скоростями обратного тока внутри отрывной области и

меньшей наполненностью профиля осредненной скорости над ней. Несколько медленнее происходит в расчетах восстановление профиля осредненной скорости после ступеньки. Кинетическая энергия турбулентности определяется с большей ошибкой. Ее значения как внутри области обратных токов так и над ней существенно завышены. Последнее частично объясняется тем, что в экспериментах турбулизация потока начинается после срыва со ступеньки, а над ней поток ламинарный. В целом, можно сделать вывод о том, что используемая модель и метод решения уравнений удовлетворительно описывают распределение осредненной скорости в потоке при наличии отрывного течения.

Если за ступенькой находится каверна (рис. 1) размеры области отрыва увеличиваются.

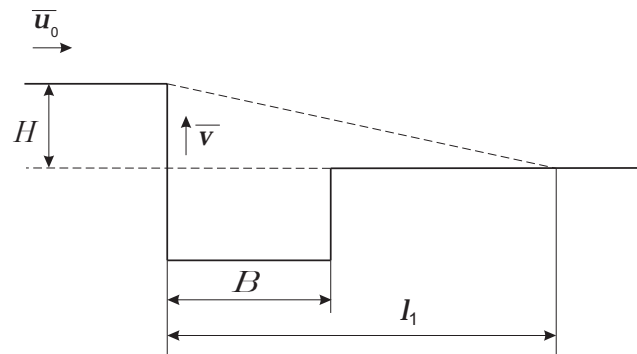


Рис. 1

В таблице 1 приведены результаты расчетов для $H/\delta = 0.6$, а в таблице 2 для $H/\delta = 1.4$.

Таблица 1

B/H	1.67	3.33	5.0
L/L_0	1.42	1.25	1.37
V_{max}	0.032	0.102	0.104

Таблица 2

B/H	0.28	0.71	1.43	2.14	2.86	4.27	5.71
L/L_0	1.17	1.51	1.35	1.30	1.23	1.12	1.05
V_{max}	0.131	0.131	0.120	0.092	0.070	0.058	0.057

Здесь H — высота ступеньки, δ — толщина пограничного слоя над ней, B — ширина каверны, L — размер области возвратных токов, L_0 — размер этой области при отсутствии каверны, V_{max} — максимальная вертикальная скорость вблизи ступеньки, отнесенная к скорости невозмущенного потока.

Это увеличение существенно как для ступенек, высота которых больше толщины пограничного слоя перед ступенькой так и для маленьких ступенек, высота которых меньше толщины пограничного слоя. Увеличение глубины каверны несколько увеличивает размеры области отрыва. С ростом ширины каверны размеры отрывной зоны уменьшаются до тех пор пока край каверны не приближается к границе отрывной зоны после чего отрывная зона несколько увеличивается и затем оторвавшийся пограничный слой присоединяется к угловой точке каверны. Причиной роста размеров отрывной зоны повидимому является разворот оторвавшегося потока в каверну, что приводит к возникновению более интенсивной струи поднимающейся вдоль ступеньки и увеличивает вертикальную составляющую скорости вблизи ступеньки. Чем больше максимальная вертикальная скорость вблизи поверхности ступеньки тем больше размеры области отрыва поскольку струя как бы отесняет поток над ступенькой. Отметим, что при отсутствии каверны максимальная вертикальная скорость, отнесенная к скорости невозмущенного потока, невелика $V_{max} = 0.057$.

Очевидно, что эффект будет наблюдаться в том случае, если каверна не слишком узкая. Однако, даже при достаточно малой ширине каверны $\frac{B}{H} = 0.28$, когда в ее нижней части образуется отдельный вихрь, эффект сохраняется, хотя влияние каверны при этом незначительно. И в этом случае струя, поднимающаяся вдоль поверхности ступеньки, имеет место, но ее ширина мала и влияние слабее.

Отметим, что использование более сложной модели турбулентности и более точных граничных условий может изменить количественные результаты расчетов, но вряд ли приведет к исчезновению обнаруженного эффекта, который может использоваться в регулирующих устройствах.

Литература

1. *Kamenetsky E., Vieru N.* Model of air flow and pollution concentration in urban canyons // *Boundary-Layer Meteorology*.—1995.—V. 73, No. 1-2.—P. 203-206.
2. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика.—М.: Мир, 1980.—616 с.
3. *Avva K. R., Kline S. J., Ferziger J. H.* Computation of turbulent flow over a backward-facing step — zonal approach // *AIAA Paper*.—1988, No 611.—10p.