

Б. С. АГРОВСКИЙ, Е. П. АНИСИМОВА, И. И. ИВЛЕВ,
А. А. СПЕРАНСКАЯ, М. С. ТУГЕЕВА

СТРУКТУРА ПОТОКА НАД УТРИРОВАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Представлены результаты инструментального исследования структуры потока, распространяющегося над шероховатостью, размеры которой сравнимы с масштабом самого потока. Работа выполнена в натуральных условиях на р. Полометь и в лаборатории в гидродинамическом лотке и аэродинамической трубе. Представлены профили осредненной скорости потока, измеренные в различных сечениях за шероховатостью, и функции спектральной плотности модуля пульсаций скорости. Показано, что при обтекании воздушным и водным потоками грубой шероховатости за последней возникает отрывное течение.

В данной работе обсуждаются результаты натуральных исследований, выполненных на р. Полометь, и лабораторных экспериментов, проведенных в гидродинамическом лотке и аэродинамической трубе.

Измерения на р. Полометь проводились в приглубой части русла, где наблюдались песчаные гряды с крутым низовым откосом, носившие квазирегулярный характер. Средняя высота гряд составляла 8—10 см при общей глубине потока порядка 40 см. Интенсивность турбулентности в основном ядре потока не превышала 12%. Для измерения средней скорости течения использовалась микровертушка, снабженная счетно-импульсным механизмом (разработка ГГИ) и реверсивная микровертушка [1]. Последняя позволяет определять абсолютное значение скорости и ее направление. Для регистрации модуля пульсаций скорости применялся термогидрометр, датчиком которого служило полупроводниковое термосопротивление МТ-54 [2]. Чувствительность такого термогидрометра составляла 0,05 см/с. Запись модуля пульсаций скорости велась на магнитную ленту [3] и на шлейфовый осциллограф Н-700.

На рис. 1 приведен пример профилей осредненной скорости потока, измеренных над гребнем и над подвальем песчаной гряды на р. Полометь. Из рисунка видно, что профиль скорости над гребнем (1) имеет вид, типичный для турбулентного пограничного слоя на твердых поверхностях. В ядре потока над подвальем гряды (2) осредненная скорость несколько меньше соответствующей скорости над гребнем, а направление скорости в придонной области противоположно направлению скорости основного потока. Отрицательные скорости у нижней границы потока обуславливают существование точки перегиба на про-

филе скорости, что с неизбежностью ведет к возникновению гидродинамической неустойчивости [4].

На рис. 2 приведены примеры функций спектральной плотности модуля пульсаций скорости, измеренных над гребнем (1) и в подвалье (2 и 3) песчаной гряды. Как видно из рисунка, функции спектральной плотности имеют один четко выраженный максимум, причем в спек-

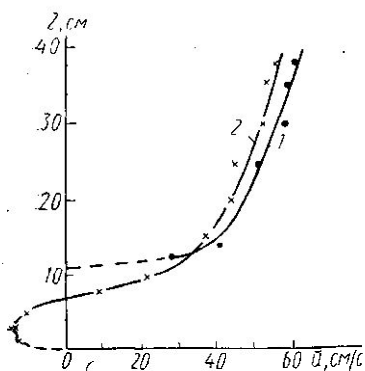


Рис. 1. Профили осредненной скорости течения над гребнем (1) и над подвальем (2) песчаной гряды

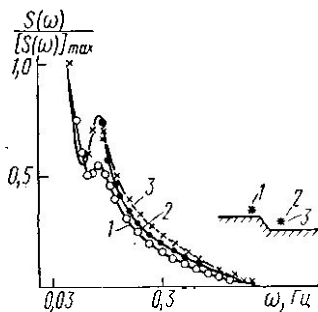


Рис. 2. Функции спектральной плотности модуля пульсаций скорости над гребнем (1) и в подвалье (2 и 3) песчаной гряды

рах, измеренных в подвалье песчаной гряды, он выражен несколько ярче, чем над гребнем, что характерно для всего полученного материала. Последнее свидетельствует о том, что в пограничном слое за шероховатостью расположен источник квазирегулярных колебаний скорости.

Помимо натуральных наблюдений был проведен лабораторный эксперимент по исследованию поля скорости воздушных и водных потоков, обтекающих грубую шероховатость. Эксперименты были поставлены в гидродинамическом лотке географического факультета МГУ и в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ, где были установлены модели утрированной шероховатости, имевшие форму волны.

Для измерения характеристик поля скорости водного потока в гидродинамическом лотке использовалась та же аппаратура, что и на р. Полометь. Измерение же вектора средней скорости и пульсаций скорости воздушного потока в аэродинамической трубе производилось с помощью механотрона марки 6МХ-2Б. Измерения на лабораторных установках были выполнены при различных числах Рейнольдса. Интенсивность турбулентности в набегающем потоке составляла: в гидродинамическом лотке 10%, в аэродинамической трубе 0,2%. Промеры, проведенные на экспериментальных установках, обнаруживают дополнительные закономерности и вырисовывают пространственную структуру пограничного слоя.

На рис. 3 представлены примеры профилей рельефа подстилающей поверхности и вертикальных профилей средней скорости над рельефом в водном и в воздушном потоках. На рис. 3, а схематически изображена картина линий тока за уступом. Из рисунка видно, что непосредственно за уступом наблюдается застойная зона, характеризующаяся малыми нерегулярными скоростями, толщина которой уменьшается вниз по

потоку. За застойной зоной расположена область, в которой наблюдается возвратное течение. Максимальные значения отрицательных скоростей и максимальная толщина области возвратного течения достигается примерно в центре участка, на котором возвратное течение прослеживается. Эксперименты показали, что как в воздушном, так и в водном потоках застойная зона смещается вниз по потоку по мере увеличения числа Рейнольдса. При этом толщина области, где наблю-

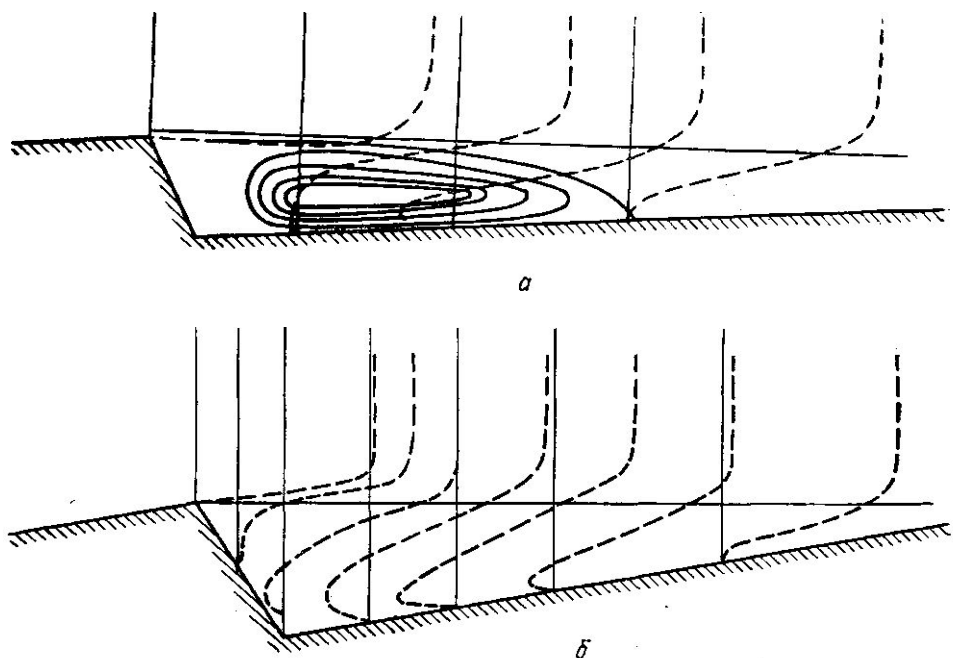


Рис. 3. Профили рельефа подстилающей поверхности и вертикальные профили средней скорости над рельефом: *а* — водный поток, *б* — воздушный поток

дается возвратное течение, уменьшается, а величина отрицательных скоростей возрастает. Профили средней скорости и линий тока, изображенные на рис. 3, дают представление о трансформации пограничного слоя вниз по потоку за уступом.

Кинематика потока за уступом формируется в результате взаимодействия трех факторов: инерции потока, тормозящего влияния твердой подстилающей поверхности и положительного градиента давления, возникающего вследствие расширения потока за шероховатостью. В направлении, нормальном движению потока, давление распределено примерно однородно, а потому возникающий положительный градиент давления также равномерно распределяется по сечению. При замедлении всего потока скорость в придонной области также уменьшается и под действием положительного градиента давления обращается в ноль, а затем меняет знак. Таким образом, при обтекании уступа около твердой поверхности возникает возвратное течение. Количество заторможенной жидкости между стенкой и внешним потоком растет и область возвратного течения расширяется, оттесняя внешний поток от границы, т. е. растет толщина пограничного слоя и происходит его отрыв.

Уравнение движения в пограничном слое в стационарном случае имеет вид

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_{z=0} = \frac{dP}{dx}.$$

Знак второй производной скорости на стенке определяется знаком градиента давления. В зоне замедленного движения, где $\frac{dp}{dx} > 0$, величина $\partial^2 u / \partial z^2$ тоже больше нуля. В основном же ядре потока $\partial^2 u / \partial z^2 < 0$. Следовательно, в пограничном слое, когда внешнее течение замедлено, профиль скоростей обязательно должен иметь точку перегиба. Как известно, профили скоростей с точками перегиба неустойчивы. Последнее является необходимым и достаточным условием для возникновения и существования нарастающих колебаний, приводящих к разрушению пограничного слоя, после чего пограничный слой начинает формироваться заново. Следует ожидать, что процесс разрушения пограничного слоя сопровождается выбросом вихрей в ядро потока. Последнее должно проследиваться по кривым функций спектральной плотности пульсации скорости в виде максимума на характерной частоте. В нескольких точках на вертикалях, проходящих приблизительно в середине области, охваченной возвратным движением, были определены функции спектральной плотности пульсаций скорости, примеры которых представлены на рис. 4 (водный поток). Из рисунка видно, что спектральные кривые обладают одним четко выраженным максимумом. Рассмотрение приведенных результатов свидетельствует о квазирегулярном характере образования вихря в пограничном слое. Область возвратного течения как бы дышит с некоторой устойчивой частотой. Этот вывод хорошо согласуется с результатами измерений, выполненных на р. Поломать (см. рис. 2). Возникновение отрывных течений при обтекании грубой шероховатости может отрицательно сказаться на загрязнении как воздушной, так и водной среды.

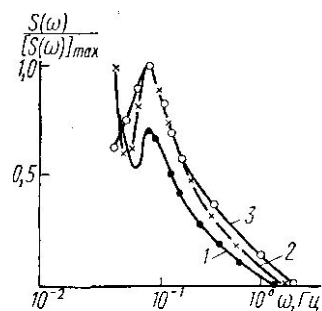


Рис. 4. Функции спектральной плотности модуля пульсаций скорости: 1—1, 2—5 и 3—7 см от дна

ЛИТЕРАТУРА

1. Селянинов М. Г. Реверсивная микровертушка. В тр. «Координационного совещания по гидротехнике», вып. 51. М., 1969.
2. Контобойцева Н. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 5, 1962.
3. Орлов А. С., Сперанская А. А. «Изв. АН СССР», № 13, вып. 3, 1969.
4. Rayleigh. Sci Papers, Cambridge, Univ. Press., v. 1, 474—487, 1880.

Поступила в редакцию
9.7 1974 г.

Кафедра физики моря
и вод суши