

УДК 556.535.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОЙ СТРУКТУРЫ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ РУСЕЛ

О. Н. Мельникова, Ю. Г. Пыркин

(кафедра физики моря и вод суши)

Течение горных рек обладает интересной особенностью: оно делится на три струи: прибрежные и центральную, турбулентный обмен между которыми значительно меньше, чем внутри струй. Это явление легко визуализировать, введя краситель в одну из струй. На рис. 1 приведена фотография, полученная в натуральных условиях.

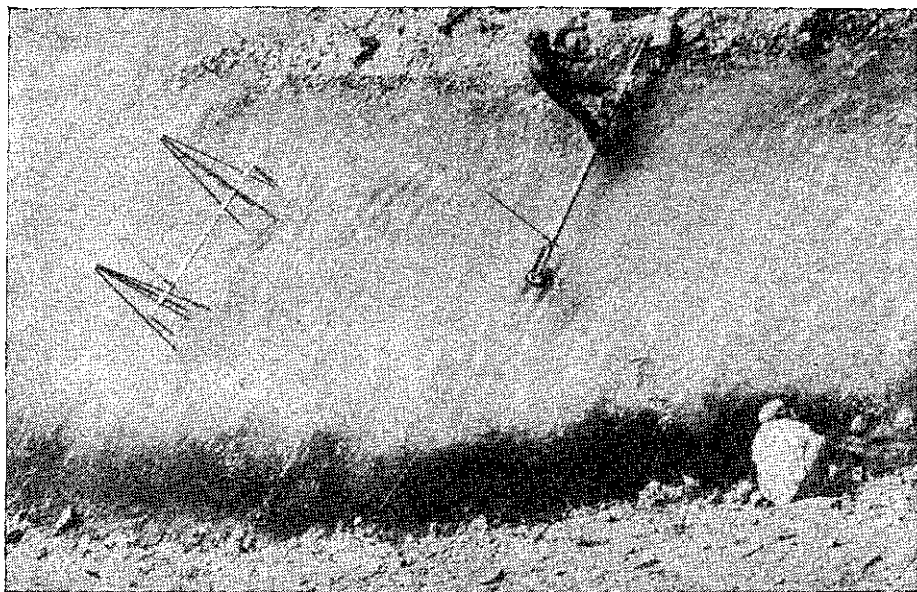


Рис. 1

Предположим, что вблизи границы между струями жидкость интенсивно вращается в плоскости поперечного сечения. Обмен между струями при этом будет затруднен. Основные особенности движения жидкости в этой области можно получить, определив поле сил в поперечном сечении потока по распределению нормальных и касательных турбулентных напряжений. Эти величины, к сожалению, экспериментально изучены недостаточно. Поэтому определим поле сил, используя гипотезу Прандтля [1], связывающую турбулентные характеристики потока с распределением средней скорости.

Следуя гипотезе Прандтля, представим жидкость в виде дискретных объемов. Пульсации скорости этих объемов в поперечном сечении v' (по горизонтали) и w' (по вертикали) обуславливаются взаимодействием объемов, движущихся с разными средними скоростями, и определяются градиентом средней скорости в данной области. Сила, дей-

дствующая на единичный объем, пропорциональна градиенту величин $\rho v'^2$, $\rho \omega'^2$ и $\rho v' \omega'$ (кинетической энергии поперечного движения объема) и направлена вдоль градиента средней скорости $\bar{U}$, т. е. перпендикулярна к изотак, проходящей через точку, в которой находится элементарный объем.

Следовательно, если верно сделанное выше предположение, в области вращения жидкости на границе турбулентных струй изотак должны образовывать замкнутые кривые.

$H, м$ Поверхность

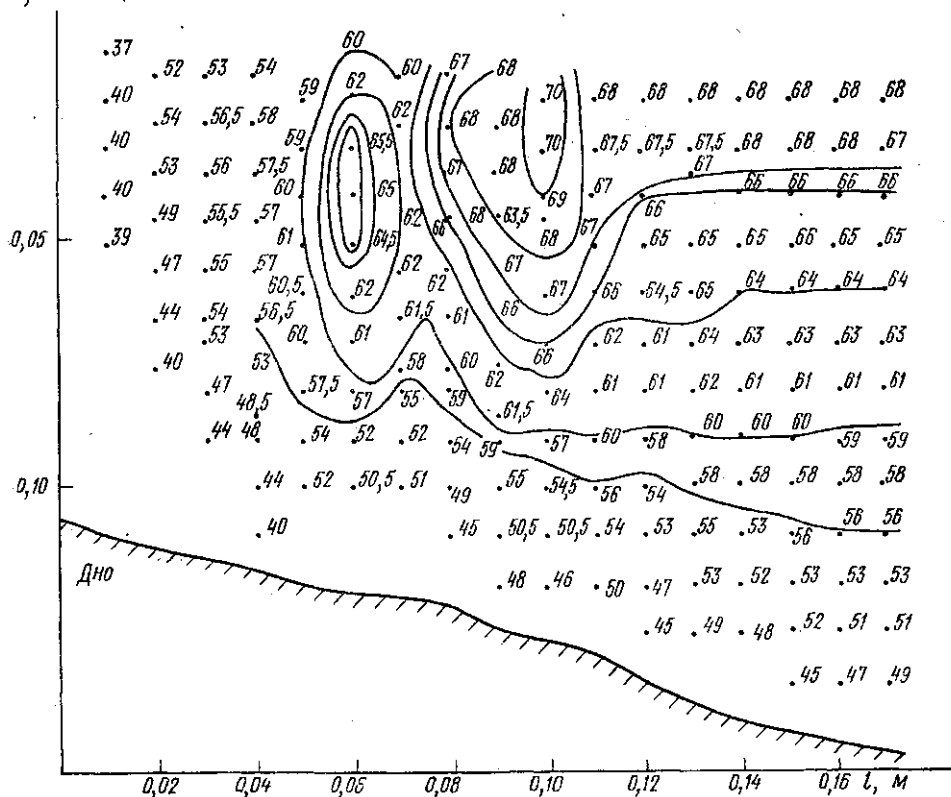


Рис. 2

Для проверки сделанных предположений был проведен эксперимент на модели русла с закрепленной шероховатостью длиной 10 м, шириной 1 м, глубиной в центре потока 0,5 м. Скорость потока измерялась трубкой Пито диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м и менялась от 40 до 70 см/с (среднеквадратичное отклонение $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с).

На рис. 2 показано характерное распределение линий равной скорости по поперечному сечению потока для скоростей $U \geq 50$ см/с. На расстоянии 6 и 10 см от берега обнаружены максимумы скорости, определяющие замкнутый характер изотак. Область минимальных значений скорости, лежащая между двумя максимумами в 7 см от берега, совпадает с границей прибрежной и центральной струй, визуализированной с помощью красителя. В этой области градиент скорости U меняет свой знак. В соответствии с нашей моделью меняет свой знак и сила, действующая на элементарный объем, препятствуя его переходу

ду из струи в струю. Таким образом, замкнутый характер изотак экспериментально подтверждает сделанные выше предположения о вращении жидкости на границе струй. Этот результат получен на основе дискретной модели турбулентного течения, предложенной Прандтлем, и, возможно, не является непосредственным следствием уравнения Навье—Стокса.

В результате проведенного эксперимента выяснено, что существует значение средней скорости $U_{кр}=50$ см/с, при котором происходит образование струйной структуры потока. В предыдущем нашем эксперименте [2] в русле с незакрепленной шероховатостью (песком) шириной $l=1$ м струйная структура наблюдалась при $U=10$ см/с, при этом глубина на границе струй $h_{гр} \approx 0,003$ м. Значительное отличие величин средней скорости в этих экспериментах обусловлено тем, что в русле с закрепленной шероховатостью была обеспечена большая глубина на границе турбулентных струй $h_{гр}=0,12$ м (для более удобного исследования распределения средней скорости по поперечному сечению). Однако при этом уменьшаются возмущения среды в этой области. Поэтому для достижения степени турбулизации, достаточной для образования струйной структуры, необходимо увеличение средней скорости. Сравнение характеристик нескольких потоков, обладающих струйной структурой, показало, что степень турбулизации можно характеризовать числом Рейнольдса, умноженным на некоторый коэффициент. На основе анализа двух модельных и одного натурного эксперимента можно предположить, что этот коэффициент пропорционален отношению ширины потока l к глубине на границе струй $h_{гр}$ и тогда

$$Re \sim \frac{Ul}{\nu} \left(\frac{l}{h_{гр}} \right).$$

При таком выборе параметров критическое значение числа Рейнольдса для исследованных потоков составило $Re=3 \cdot 10^5$.

Механизм зависимости струйной структуры потока от глубины становится ясен из анализа уравнения [3]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v'^2} - \overline{w'^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{v'w'},$$

где

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y},$$

v, w — мгновенные значения скорости в поперечном сечении, откуда следует, что закручивание водных масс интенсифицируется при возрастании неоднородности сил давления (первое слагаемое правой части уравнения) и турбулентного трения (второе слагаемое). Так как эта неоднородность увеличивается при уменьшении глубины потока, то, следовательно, увеличивается закручивание воды, что подтверждает правильность выбора характерного линейного параметра.

В потоках с меньшим значением безразмерного параметра струйное течение не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Prandtl L. Essentials of Fluid Dynamics. L., 1953, p. 452. [2] Мельникова О. Н. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1981, 22, № 2, с. 84. [3] Einstein H. A. Trans. Amer. Geophys. Union, 1958, 39, N 6, p. 1085.

Поступила в редакцию
21.10.81