

УДК 556.335.2

К ВОПРОСУ О ПОПЕРЕЧНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ПРИБРЕЖНОЙ ОБЛАСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО РУСЛОВОГО ПОТОКА

О. Н. Мельникова, Ю. Г. Ныркин, Г. Г. Хунджуа

(кафедра физики моря и вод суши)

Известно, что в пограничных слоях жидкости могут возникать так называемые вторичные течения, не совпадающие по направлению с внешним течением [1]. Важность исследования вторичных течений определяется не только теоретическим интересом, но и необходимостью решения таких прикладных задач, как улучшение судоходства на реках, строительство гидротехнических сооружений и др. Особое значение здесь имеют поперечные циркуляции потока на закругленных руслах.

Впервые такая задача была решена Жуковским в работе [2], где было показано, что в рамках модели идеальной жидкости в закругленных руслах установившееся движение жидкости возможно только при наличии вторичного течения в виде поперечной циркуляции жидкости.

В отличие от случая закругленных русел, неустойчивые вторичные течения были обнаружены Лосиевским [3] экспериментальным путем при исследовании ускоренных движений в прямолинейном канале. Однако попытки теоретического описания процесса (см., например, [4]) не привели к удовлетворительному результату.

Эксперименты, проведенные в последнее время [5], показали, что в прямом русле существуют не только неустойчивые поперечные циркуляции жидкости, но и регулярное циркуляционное движение жидкости в поперечном сечении прибрежной области русловых потоков. Из работы [5] следует, что регулярное поперечное циркуляционное движение жидкости вблизи берега приводит к тому, что обычно на реках наблюдается образование турбулентных прибрежных струй, не смешивающихся с центральной частью потока. Такое явление легко наблюдать при окрашивании прибрежных струй частицами почвы или другими примесями, так как центральная часть потока при этом не окрашивается.

Основным свойством естественных русловых потоков является турбулентный характер их движений. Нерегулярность, свойственная турбулентному движению, приводит к сильному перемешиванию жидкости. Между тем, как следует из [5], в прибрежной области быстрых русловых потоков наблюдается нарушение турбулентного обмена между центральной частью потока и прибрежной областью.

Цель настоящей работы состоит в выявлении связи поперечной циркуляции жидкости в прибрежной области потока с турбулентными характеристиками движения жидкости в этой области.

Чтобы получить исходные положения для выяснения связи поперечной циркуляции жидкости с турбулентным движением руслового потока, необходимо подробно исследовать турбулентные характеристики движения потока в его поперечном сечении.

Нами был проведен эксперимент по исследованию трех компонент турбулентных характеристик движения естественного руслового потока. Измерения велись в натуральных условиях. Исследовался прямолинейный участок потока. Параметры потока в исследованном поперечном сече-

нии: ширина 15 м, максимальная глубина 85 см, максимальная средняя скорость 80 см/с.

Измерительная аппаратура в процессе эксперимента перемещалась в поперечном сечении потока вдоль эстакады, перекинутой с одного берега реки на другой, с помощью автоматически управляемой площадки. С площадки спускались к поверхности воды штанги для крепления зонда с трехкомпонентным датчиком пульсаций скорости. Эта система позволяла по команде из кабины управления выводить датчик в нужную точку поперечного сечения исследуемого потока. Сигнал с датчика передавался по кабелю к регистрирующей аппаратуре, установленной в кабине управления.

Для определения турбулентных характеристик потока измерялись три составляющие вектора мгновенной скорости движения жидкости. Измерения велись с помощью термогидрометра постоянного тока, включенного по схеме двойного моста. Термогидрометр для измерения трех компонент вектора мгновенной скорости был сконструирован нами на основе двухкомпонентного термогидрометра, созданного на кафедре физики моря [6]. Для измерения третьей составляющей скорости потока на насадке термогидрометра на двух дополнительных держателях была натянута вторая измерительная нить в плоскости, перпендикулярной к плоскости первой нити. Такая схема включения термогидрометра и раздельное питание измерительных нитей позволили осуществить синхронное измерение трех составляющих вектора мгновенной скорости потока.

Турбулентные пульсации скорости потока регистрировались в аналоговом виде на шлейфовом осциллографе НС41У4.2. Чувствительность системы составляла 1 мм/с на 1 мм отклонения аналоговой кривой. Максимальная частота, которая могла быть зарегистрирована системой, составляла 30 Гц, при этом максимальная частота, обнаруженная в спектре турбулентных пульсаций скорости, составляла 3 Гц.

Средняя скорость потока измерялась с помощью трубки Пито. Для одновременного измерения пульсаций скорости потока и средней скорости в одной и той же точке трубка Пито была жестко связана с насадкой термогидрометра. Поперечный размер насадки и трубки Пито вместе составлял 2 см.

Для того чтобы подробно исследовать турбулентные характеристики движения потока в области прибрежной автономной струи, был проведен предварительный эксперимент, в ходе которого прибрежная струя была визуализирована с помощью красителя. После определения области поперечного сечения потока, занятой прибрежной струей, в пределах этой области были намечены четыре вертикали, на которых проводились измерения. Вертикали располагались на расстоянии 20 см друг от друга, причем первая вертикаль — на расстоянии 40 см от уреза воды. С помощью двухкоординатного устройства измерительная аппаратура перемещалась вдоль этих вертикалей, производя измерения через каждые 10 см.

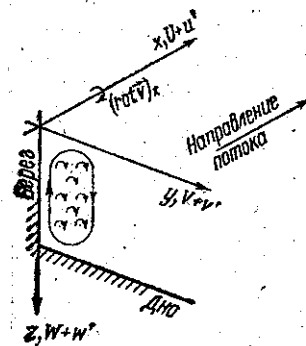
Синхронное измерение трех компонент пульсационной составляющей скорости потока позволило после статистической обработки результатов получить распределение турбулентных напряжений Рейнольдса по поперечному сечению потока. Основные результаты сведены в таблицу. Доверительный интервал полученных результатов для вероятности 0,8 не превышал 5% от измеряемой величины практически во всей области измерений. В таблице приведены величины ω'^2 и v'^2 , полученные на основе измерения поперечной горизонтальной составляющей

скорости потока v' и вертикальной поперечной составляющей скорости потока w' . Горизонтальная продольная пульсационная составляющая скорости u' , измеренная в эксперименте, позволила получить величину u'^2 причем эта величина на порядок превышала величины w'^2 и v'^2 во всей области измерений. Следовательно, поле скорости в исследованной области анизотропно.

Анализ экспериментальных данных показал, что анизотропия поля скорости потока в прибрежной области является основной особенностью турбулентного движения потока. Причем отличаются не только продольная и поперечные составляющие скорости, но, как видно из таблицы, и поперечные составляющие не равны друг другу. В таблице приведена разность значений поперечных величин $w'^2 - v'^2$. В изменении разности $w'^2 - v'^2$ по поперечному сечению потока наблюдаются следующие закономерности: 1) величина $w'^2 - v'^2$ растет от нулевого значения вблизи поверхности с увеличением глубины; 2) величина $w'^2 - v'^2$ убывает от максимального значения на первой вертикали при движении к центру потока. Отметим, что максимальное значение разности $w'^2 - v'^2$ достигает 50% от величины w'^2 .

Экспериментальные данные, приведенные в таблице, отражают основные особенности турбулентного движения жидкости в прибрежной области руслового потока. Следовательно, используя эти данные в качестве основных предпосылок, можно перейти к качественному анализу движения жидкости вблизи берега и выявлению связи поперечной циркуляции жидкости с турбулентными характеристиками движения.

Для проведения качественного анализа движения жидкости в прибрежной области турбулентного потока рассмотрим поток, направленный по оси x (рисунк). Предположим, что движение потока стационарно. Кроме того, пусть усредненные характеристики потока не меняются вдоль оси x . В этом случае уравнение движения жидкости в векторном виде запишется следующим образом:



$$(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

а уравнение неразрывности — в виде

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{v} — вектор полной скорости частицы жидкости, ∇ — оператор Гамильтона.

Действуя на левую и правую части уравнения (1) оператором rot , получим

$$\nu \nabla^2 (\text{rot } \mathbf{v}) = -\text{rot} [(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v}]. \quad (3)$$

Применим к уравнению (3) правила осреднения Рейнольдса. Выпишем компоненту полученного уравнения, направленную вдоль оси x . При этом пренебрежем в каждом члене уравнения величинами второго порядка малости. Получим

$$\nu \nabla^2 (\text{rot } \mathbf{v})_x = -\frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v'^2} - \overline{w'^2}) - \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{v'w'}. \quad (4)$$

Для упрощения анализа учтем, что в соответствии с экспериментальными данными $\overline{v'w'} \ll \overline{w'^2} - \overline{v'^2}$. Следовательно, в правой части уравнения (4) можно пренебречь вторым слагаемым. Как следует из экспериментальных данных, приведенных в таблице, разность $\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$

Глубина, см	I вертикаль			II вертикаль			III вертикаль			IV вертикаль		
	$\overline{v'^2}$	$\overline{w'^2}$	$\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$	$\overline{v'^2}$	$\overline{w'^2}$	$\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$	$\overline{v'^2}$	$\overline{w'^2}$	$\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$	$\overline{v'^2}$	$\overline{w'^2}$	$\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$
12	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
22	0,02	0,06	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,05	0,02
32	0,05	0,12	0,07	0,04	0,08	0,04	0,02	0,05	0,03	0,05	0,08	0,03
42	0,11	0,22	0,11	0,07	0,14	0,07	0,04	0,09	0,05	0,09	0,13	0,04
52	0,16	0,31	0,15	0,12	0,23	0,11	0,09	0,16	0,07	0,16	0,22	0,06
62	0,30	0,47	0,17	0,30	0,45	0,15	0,28	0,40	0,01	0,32	0,41	0,09

Значения $\overline{v'^2}$ и $\overline{w'^2}$ даны в $\text{см}^2/\text{с}^2$.

монотонно убывает по оси y и возрастает по оси z , что позволяет представить эту разность в виде произведения гармонических функций переменных y и z . При этом вводятся постоянные коэффициенты, подобранные таким образом, чтобы удовлетворить граничным условиям. Тогда решение дифференциального уравнения (4) удобно искать в виде

$$(\text{rot } \mathbf{v})_x = k \cos\left(\frac{\pi}{a} y\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} z\right), \quad (5)$$

где k , a , b — постоянные коэффициенты. Подставляя выражение (5) в уравнение (4) и требуя, чтобы функция на границах обращалась в ноль, получаем

$$(\text{rot } \mathbf{v})_x = -\frac{c}{v} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{w'^2} - \overline{v'^2}), \quad \text{где } c = \text{const}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что $(\text{rot } \mathbf{v})_x$ отличен от нуля в той области потока, где $\overline{w'^2} \neq \overline{v'^2}$, т. е. поле пульсаций скорости анизотропно.

Полученное уравнение (6) задает вихревое поле скорости в прибрежной области потока. Так как поток однороден вдоль оси x , вихревое поле можно представить как множество вихревых нитей, вытянутых вдоль оси x , интенсивность которых

$$\Gamma_i = (\text{rot } \mathbf{v})_x \sigma, \quad (7)$$

где σ — площадь нормального сечения одной вихревой нити.

Из решения общей задачи движения жидкости о нахождении поля скорости по известному вихревому полю [7] известно, что вихревые нити в жидкости взаимодействуют друг с другом. Это приводит к тому, что возникает вращение жидкости вокруг общего центра инерции во всей прибрежной области. Компоненты скорости движения жидкости определяются в точке с координатами y , z следующим образом [7]:

$$V = -\frac{1}{2\pi} \sum_i \frac{\Gamma_i (y - y_i)}{\rho_i^2}, \quad W = -\frac{1}{2\pi} \sum_i \frac{\Gamma_i (z - z_i)}{\rho_i^2},$$

$$\rho_i^2 = (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2. \quad (8)$$

Положение центра инерции может быть найдено по формуле

$$y_c = \frac{\sum_i \Gamma_i y_i}{\sum_i \Gamma_i}, \quad z_c = \frac{\sum_i \Gamma_i z_i}{\sum_i \Gamma_i} \quad (9)$$

Вблизи центра инерции, как следует из (8), вихревые движения, порожденные различными вихревыми штирями, компенсируют друг друга. Наиболее интенсивное вращение происходит на границах этой области.

Направление вращения определяется знаком разности $\overline{\omega'^2} - \overline{v'^2}$ в уравнении (6). Из эксперимента следует, что эта разность везде положительна, убывает по y и растет по z . Следовательно, правая часть (6) положительна и вращение происходит по часовой стрелке (см. рисунок) у левого берега и против часовой стрелки у правого. Внутри прибрежной области вихри компенсируют друг друга, что приводит к интенсивному вращению жидкости лишь на границе рассматриваемой области.

Таким образом, в результате проведенного натурального эксперимента и качественного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Основной особенностью поля скорости вблизи берега является его анизотропия.

2. Существенным отличием поля скорости в этой области является изменение разности величин $\overline{\omega'^2} - \overline{v'^2}$ по осям y и z .

3. Изменение величины $\overline{\omega'^2} - \overline{v'^2}$ в прибрежной области поперечного сечения потока, определенное на основе анализа уравнений Рейнольдса, приводит к тому, что $\text{rot } v \neq 0$.

4. В прибрежной области потока, где $\text{rot } v \neq 0$, возникает циркуляция жидкости в поперечном сечении потока вокруг общего центра инерции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бай Ши И. Турбулентное течение жидкости и газов. М.: ИЛ, 1962, с. 66.
[2] Жуковский Н. Е. Тр. ЦАГИ, 1931, 95, с. 54—84. [3] Лосиевский А. И. Тр. МОЦНИВТ, 1934, 86, с. 14. [4] Великевич П. А. В кн.: Водное хозяйство Белоруссии. Минск, Изд-во АН СССР, 1963, с. 155. [5] Мельникова О. Н. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1981, 22, № 2, с. 84. [6] Колесников А. Г. и др. Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1958, № 3, с. 405. [7] Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика. Т. 1. М., 1955, с. 193—197.

Поступила в редакцию
06.12.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 6

УДК 519.95

ЗАДАЧИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МЕССБАУЭРОВСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Е. Н. Терентьев

(кафедры математики)

В настоящее время решение задач автоматизации экспериментальных исследований с эффективным использованием средств вычислительной техники связывается с созданием и исследованием математических моделей работы экспериментальных установок, схем расчетов на ЭВМ и применением этих моделей в задачах анализа и интерпретации экспериментальных данных.