

тока. Прогоночные коэффициенты a_2 , $\vec{\beta}_2$ аналогичны (8), так как на жесткой границе поставлено условие первого рода. Вектор $\vec{\beta}_{N+2} = \vec{W}_{N+1}$ имеет вид

$$\vec{\beta}_{N+2} = (E - E a_{N+1})^{-1} (-E \vec{\beta}_{N+1}),$$

где E — единичная матрица.

Таким образом, поставленные краевые задачи для уравнений (4) и (5) могут быть решены численными методами. В результате в узлах сетки будут получены значения функции тока ψ , вычислено распределение по трапециевидальному сечению поперечных компонентов осредненной скорости $\bar{V}_3 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}$, $\bar{V}_2 = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}$, а также рассчитано распределение продольной осредненной скорости \bar{V}_1 с учетом влияния поперечных составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р о г у н о в и ч В.П. Исследование трехмерного поля осредненных скоростей в однородных по длине потоках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1971. — 28 с.
2. Ш н и п о в Ф.Д. Обобщение исследований по распределению на средней вертикали кинематического коэффициента турбулентной вязкости. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1982, вып. 12, с. 67–73.
3. Р о г у н о в и ч В.П. Распределение суммарной вязкости в потоке прямоугольного сечения. — В кн.: Проблемы использования водных ресурсов. Минск, 1971, с. 139–155.
4. Р о г у н о в и ч В.П., О с и п о в и ч А.А., Ц а ц у к Г.С. Распределение продольного компонента осредненной скорости в однородных по длине потоках трапециевидального сечения. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1980, вып. 10, с. 109–117.
5. О с и п о в и ч А.А., Б о г д а н о в и ч М.И. Экспериментальная проверка модели распределения продольных скоростей в трапециевидальном канале. — В кн.: Моделирование речных потоков. М., 1982, с. 100–103.
6. С а м а р с к и й А.А., Н и к о л а е в Е.С. Методы решения сеточных уравнений. — М., 1978. — 589 с.
7. B r u n d r e t t E., V a i n e s W.D. The production and diffusion of vorticity in duct flow. — J.Fluid Mech., 1964, vol. 19, p. 375–394.
8. E i n s t e i n H.A., L i H. Secondary currents in straight channels. — Transact. Amer. Geoph. Union, 1958, vol. 36., N 6, p. 1085–1088.

УДК 626.824

М.И.БОГДАНОВИЧ (ЦНИИКИВР)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ И НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ

Основным из преимуществ сокращенного способа определения расходов воды [1] является его высокая оперативность, достигаемая путем непосредственного измерения средней скорости потока \bar{v} в точке живого сечения, координаты которой рассчитываются заранее по методике, разработанной для случая равномерного движения. Применение этого способа для неравномерных и нестационарных потоков требует анализа отличий распределения скоростей в названных и равномерном потоках, особенно в области расположения

изотахи \bar{v} . В случае несущественных отличий методика расчета координат точек измерения средней скорости потока, использующаяся при равномерном движении, может применяться и при других видах движения. В противном случае необходимо оценить возможные погрешности в определении v , вызываемые неравномерностью и нестационарностью.

Э.В. Залуцкий [2, 3] с помощью фотосъемки выполнил исследование полей скоростей в плоских потоках с высокой степенью неравномерности. Как видно из рис. 1, в диапазоне $0 < h/N < 0,37$ при ускоренном движении, по

сравнению с равномерным, наблюдается увеличение местных скоростей, достигающее при h/N , близких нулю, 25%. При $0,37 < h/N < 1$ местные скорости равномерного потока выше, чем неравномерного. При замедленном движении наблюдается противоположная картина изменения эпюры. Рис. 1 показывает, что при всех видах движения на глубине $h = 0,37 N$, отношение $v/\bar{v} = 1$, где v — осредненная местная скорость.

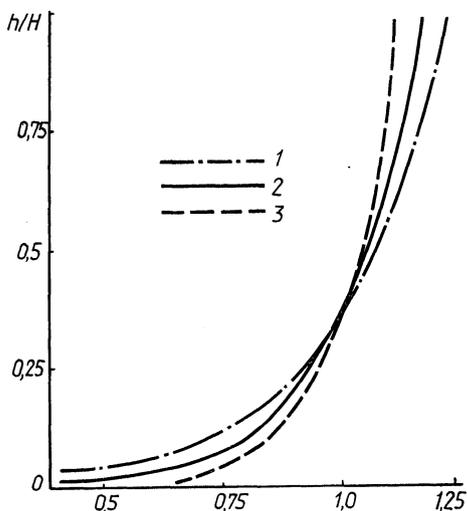


Рис. 1. Распределение скоростей, по Э.В.Залуцкому:

1 — в замедленном потоке; 2 — в равномерном; 3 — в ускоренном.

В статье [4] представлены результаты исследования неплоского потока с невысокой степенью неравномерности и указывается, что поле скоростей незначительно (в пределах точности измерений) отличается от такового в равномерных потоках. Результаты исследований скоростной структуры [2—4] неравномерных прямолинейных потоков показывают, что неравномерность движения не влияет на расположение изотахи средней скорости.

Экспериментальные исследования кинематической структуры неустановившихся открытых потоков являются довольно сложной и трудоемкой задачей, требующей тщательно разработанной методики, совершенной измерительной аппаратуры. Этим можно объяснить малочисленность подобных исследований.

Г.Ф.Федоров [5] с помощью кино съемки выполнил исследования скоростной структуры неустановившихся потоков в зеркальном лотке длиной 8 м и шириной 0,7 м. На их основании сделан вывод о том, что в неустановившемся ускоренном потоке происходит существенное, по сравнению с равномерным потоком, изменение распределения скоростей. При высокой интенсивности изменения уровня и большом значении соотношения высоты волны к глубине потока эпюра приобретает форму, при которой скорости возрастают от поверхности ко дну.

Н.Н.Федоров [6] выполнил анализ данных по распределению скоростей,

полученных в результате известных исследований неустановившегося движения на р. Тверце. Рассматривались эпюры осредненных местных скоростей на двух соседних вертикалях для параметров нестационарности $N = (1/v^2) (\partial q/\partial t) = 0,012 \div 0,017$. Анализ эпюр показывает, что при прохождении волны попуска в первые моменты времени эпюра скоростей не претерпевает значительных изменений. В дальнейшем она перестраивается от вида характерного для одного установившегося движения до вида, характерного для другого. При этом в поверхностных и придонных слоях потока значения скоростей могут отклоняться от начальных на 25 %. Из работ Г.Ф.Федорова и Н.Н.Федорова можно сделать вывод, что эпюры скоростей при нестационарном движении претерпевают значительные изменения. Однако анализ соотношений $v_{\text{пов}}/\bar{v}$ и $v_{\text{дон}}/\bar{v}$ не позволяет проследить за изменением распределения скоростей в основной толще потока, в том числе и в области изотакси средней скорости потока.

А.Н.Шабрин [7, 8] в лабораторных условиях выполнил исследование скоростной структуры плоских неустановившихся потоков с параметрами нестационарности $N = 0,0007 \div 0,44$, превышающими N , характерные для суточного регулирования [10]. Осреднение мгновенных скоростей, полученных с помощью фотосъемки, производилось по ансамблю. В работах [7, 8] отмечается, что для параметров $N \leq 0,2$ не обнаружено существенного различия в распределении скоростей равномерного и нестационарного потоков [8]. Как видно из рис. 2, при $h/H = 0,37 \div 0,4$ в ускоренном потоке скорости немного выше, а в диапазоне $0 < h/H < 0,37 \div 0,4$ — ниже, чем в равномерном. Замедленное движение дает обратную картину изменения скоростей. Как и в случае неравномерного движения, расположение изотакси средней скорости при равномерном, ускоренном и замедленном движении остается постоянным.

В литературе [5—8] приведены противоречивые выводы относительно изменений распределения скоростей в нестационарных открытых потоках по сравнению с равномерными. В работе [10] высказано предположение о том, что в исследованиях Г.Ф.Федорова параметры нестационарности были на порядок выше, чем в работах [6—8], и это обусловило получение результатов, отличающихся от данных Н.Н.Федорова и А.Н.Шаблина. М.С.Грушевский [11] указывает на недостаточно высокую точность измерений, результаты которых использовались Н.Н.Федоровым. Наиболее достоверные, по нашему мнению, выводы о распределении скоростей и расположении изотакси средней скорости потока в условиях суточного регулирования можно было бы сделать по результатам экспериментальных исследований А.Н.Шаблина. Однако потоки за водорегулирующими сооружениями могут отличаться от плоских. И поэтому необходимо дать оценку изменениям в распределении скоростей неустановившихся пространственных потоков.

Для этой цели воспользуемся данными, полученными в натуральных условиях [9]. Исследования выполнялись при равномерном и неустановившемся движении ($N = 0,001 \div 0,224$) в двух гидрометрических створах, отстоящих от водосброса на 169 и 554 м. Скорости измерялись с помощью микровертушек одновременно в 25 точках на 5 скоростных вертикалях. Сравнение эпюр скоростей на трех по стрелю вертикалях при равномерном и нестационарном движении (рис. 3) показывает, что вывод А.Н.Шаблина [8] о незначительном изменении эпюр скоростей требует уточнения, так как отклонения скоростей

у поверхности достигают 20 %. Вместе с тем в придонной части потока отклонения невелики. Например, в точке, где $v/\bar{v} = 1$, при ускоренном движении они составляют 3–4 %, при замедленном — 5–6 %.

Таким образом, выполненный анализ показал, что в неравномерных потоках, по сравнению с равномерными, в области изотакс средней скорости не наблюдается существенных отличий в распределении скоростей.

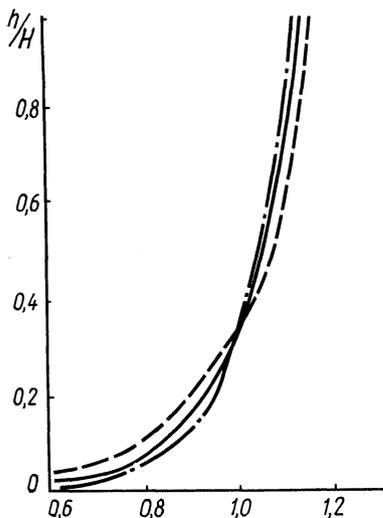


Рис. 2. Распределение скоростей в плоском неустановившемся потоке, по А.Н.Шабрину; обозначения см. на рис. 1.

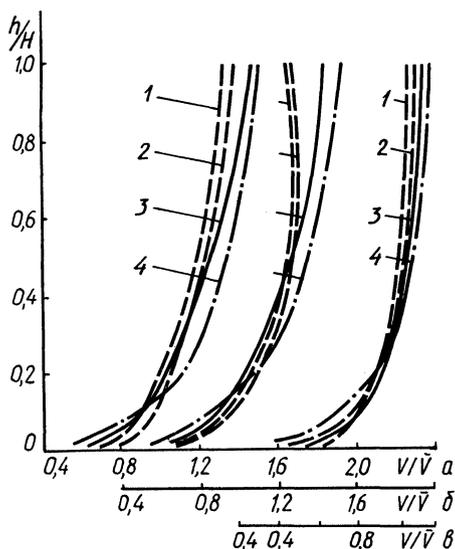


Рис. 3. Распределение скоростей на вертикалях неплоского неустановившегося потока:
 1 — ускоренное движение ($N = 0,068$);
 2 — ускоренное движение ($N = 0,018$);
 3 — равномерное движение; 4 — замедленное движение ($N = -0,0195$); а, б, в — вертикали № 1, 2, 3.

Для нестационарных неплоских потоков аналогичного вывода сделать нельзя. Непосредственное измерение средней скорости в нестационарных неплоских потоках с $N = 0,018-0,0195$, выполненное в точке живого сечения с координатами, рассчитанными по методике, разработанной применительно к равномерному движению, может привести к ошибкам 3–4 % при ускоренном движении и 5–6 % — при замедленном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович М.И. Разработка сокращенного способа определения расходов воды. — В кн.: Проблемы изучения, охраны и рационального использования водных ресурсов: Тез. докл. Всесоюз. конф. М., 1983, с. 68–70. 2. Залуцкий Э.В. Скоростная структура ускоренного турбулентного плоского потока в гидравлически гладком русле. — В кн.: Исследование по прикладной гидродинамике. Киев, 1965, с. 216–225.

3. З а л у ц к и й Э.В. О потерях энергии в турбулентных неравномерных открытых потоках. — В кн.: Исследование турбулентных одно- и двухфазных потоков. Киев, 1966, с. 45–54. 4. О с и п о в и ч А.А., Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальное исследование распределения продольных осредненных скоростей в каналах трапецеидального сечения. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1981, вып. 11, с. 135–140. 5. Ф е д о р о в Г.Ф. Изучение кинематики волны попуска. — В кн.: Труды ЦНИИЭВТ. М., 1960, вып. 19, с. 83–95. 6. Ф е д о р о в Н.Н. Влияние неустановившегося движения воды на распределение осредненных скоростей по вертикали. — В кн.: Труды ГГИ. М., 1965, вып. 121, с. 52–63. 7. Ш а б р и н А.М. Швдкїсна структура відкритих потоків при неусталеному русі. — Доповіді АН УРСР, 1963, № 11, с. 1448–1451. 8. Ш а б р и н А.Н. Исследование скоростной структуры неустановившегося открытого потока: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. — Киев, 1964. — 17 с. 9. Экспериментальное исследование переноса примесей в натуральных условиях/ В.П.Рогуневич, Э.А.Войтеховская, С.А.Бампи, М.И. Богданович. — В кн.: Водоотведение, очистка и использование природных и сточных вод. Минск, 1985, с.54–60. 10. Р о з о в с к и й И.Л., Е р е м е н к о Е.В., Б а з и л е в и ч В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. — Киев, 1967. — 276 с. 11. Г р у ш е в с к и й М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. — Л., 1982. — 289 с.

УДК 532.543

А.П.СТАНКЕВИЧ (ЦНИИКИВР)

РАСЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ВОДОТОКОВ С ПРОТОКАМИ

Основной задачей неравномерного движения в открытых руслах является построение кривой свободной поверхности. При расчетах достаточно больших объектов применение ЭВМ весьма целесообразно. В настоящее время созданы эффективные алгоритмы и пакеты программ для расчета неравномерного движения в водотоках [1, 2]. Наряду с этим практика выдвигает вопрос о расчете неравномерного движения жидкости в системе водотоков, включая протоки. При расчетах проток возникает задача определения в них расходов воды при разветвлении потока.

Подобная задача для расчетов неустановившегося движения воды решается в [5] с помощью метода параметрической прогонки. Однако он основан на том, что исходные уравнения неустановившегося движения аппроксимируются системой линейных разностных уравнений. В то же время неравномерное движение описывается нелинейным уравнением. Поэтому наиболее эффективно применение итерационного метода.

В качестве исходного взято одномерное дискретное уравнение неравномерного движения жидкости с переменным расходом [2]

$$z_{i+1} = z_i + \frac{1 + \xi}{2g} \left(\alpha_i \frac{Q_i |Q_i|}{\omega_i^2} - \alpha_{i+1} \frac{Q_{i+1} |Q_{i+1}|}{\omega_{i+1}^2} \right) + \frac{1}{\beta_1} \left(\frac{Q_i |Q_i|}{K_i^2} + \frac{Q_{i+1} |Q_{i+1}|}{K_i^2} \right) (x_{i+1} - x_i + \beta\beta_2), \quad (1)$$