

Л и т е р а т у р а

1. Б о р о в и к Е.А. Рыбопромысловые озера Белоруссии. — Минск, 1970.
2. Ж у к о в П.И. Рыбные богатства Белоруссии. — Минск, 1974.
3. Д а в ы д о в А.П. Некоторые вопросы организации озерных товарных рыбных хозяйств. — Минск, 1977.
4. С а в и н а Н.О. Рыбные ресурсы озер Белорусской ССР и перспективы их улучшения. Тр. Бел. отдел. ВНИОРХ, т. I. Минск, 1957.

УДК 627.514.001.57

Г.В. В а с и л ь ч е н к о, Р.Ф. Л у к о ш к о

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ПОЛОВОДИЙ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УЧАСТКА р. ПРИПЯТЬ ПРИ ОБВАЛОВАНИИ РЕКИ ДАМБАМИ

Обвалование р. Припять является одним из вариантов защиты земель ее поймы от затопления весенними половодьями. Связанная с этим задача выбора системы обвалования и параметров дамб для объекта со сложной морфологией и недостаточной гидрологической и гидравлической изученностью вызвала необходимость осуществления специальных исследований уровня режима половодий с использованием математического и физического моделирования. Физическое моделирование должно было обеспечить:

- прогноз уровня режима на некотором характерном участке р. Припять при наличии дамб обвалования с различными расстояниями между ними для максимальных расходов различной обеспеченности и сопоставление их с результатами математического моделирования;
- определение характера течения воды на исследуемом участке с оценкой средних скоростей в отдельных створах поймы и русла;
- оценку величин руслового и пойменного расходов (между дамбами обвалования);
- оценку скоростей у дамб обвалования в зависимости от закустаренности поймы;
- оценку возможных размывов поймы и откосов дамб.

Кроме того, физическое моделирование обеспечило наглядное изучение режимов пропуска паводковых расходов между дамбами и распространение этих сведений на другие, аналогичные по гидравлическим сопротивлениям участки реки.

На основании анализа топографических материалов по всему протяжению р. Припять, гидрологических данных и данных натурных исследований для моделирования был выбран участок длиной 15 км ниже железнодорожного моста дороги Лунинец-Сарны.

По рельефу и растительности участок достаточно типичен для р. Припять. На верхней границе участка расположен в.п. Коробы с периодом наблюдений за стоком 47 лет. Несмотря на то что в паводок с максимальными уровнями 1% обеспеченности ширина разлива достигает 22 км, моделированию подлежала только часть поймы между дамбами; поэтому ширина исследуемого участка была принята равной 4 км.

Исходя из цели моделирования, расчетным был принят паводок 1% обеспеченности: $Q_{H1\%} = 2220 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом число Рейнольдса и коэффициент гидравлического сопротивления для расчетных условий оказались равными:

$$Re_H = 650000, \quad \lambda_H = 0,0182,$$

а наименьшее допустимое число Рейнольдса в квадратической области сопротивления

$$Re_{кр} = 3150 < Re_H = 650000 \text{ при } \left(\frac{R}{\Delta}\right)_H = 7 = f(Re_H, \lambda) .$$

В соответствии с этим минимально допустимый масштаб модели с учетом глубины потока $h_H \ll B \ll L$ (где B и L – ширина и длина участка) мог быть принят равным 1:35, что следует из требования тождественности критериев Фруда [1,2], т.е.

$$M_{\min} = (M_{Re})^{2/3} = \left(\frac{Re_H}{Re_{кр}}\right)^{2/3} = \left(\frac{650000}{3150}\right)^{2/3} = 35.$$

Несмотря на то что модель участка р. Припять в масштабе 1:35 обеспечила подобие моделирования ($Fr_M = Fr_H = 0,008$), она не могла быть принята к исполнению по следующим соображениям: для строительства модели такого масштаба потребовалась бы гидравлическая площадка 428 x 114 м. Кроме того, целью работы являлось получение достоверных значений средних глубин и скоростей, а не всех кинематических, динамических и турбулентных характеристик потока. В этих условиях наиболее целесообразным является путь решения задачи на модели с искажением ее масштабов. В таком случае водный поток в натуре и на модели уже описывается не системой уравнений Рейнольдса, а уравнениями Сен-Венана [3].

Из уравнений Сен-Венана с помощью масштабных коэффициентов M_H , M_I , M_V , M_{iTP} и некоторых преобразований можно получить три определяющих моделирование комплекса:

$$-\frac{Mv^2}{M_g M_h} = 1; \quad \frac{M_{i_{тр}}}{M_{i_0}} = 1; \quad \frac{M_v M_t}{M_1} = 1. \quad (1)$$

Подставив в (1) вместо масштабных коэффициентов соответствующие величины, можно получить известные критерии подобия:

$$\frac{v^2}{gh} = idem = Fr \quad (\text{критерий Фруда}), \quad \frac{vt}{l} = idem = N_0$$

(критерий гомохронности), $\frac{i_{тр}}{i_0} = idem = E_{тр}$ (критерий трения).

Выполнение условий (1) обеспечивает подобие глубин и скоростей открытых потоков, причем как без искажения, так и с искажением геометрических масштабов модели, ибо вывод критериев не требует выполнения каких-либо дополнительных условий.

Для гидравлического моделирования медленно изменяющихся неравномерных потоков (к ним относится и рассматриваемый случай) достаточно выполнения условий $Fr = idem$ и $E_{i_{тр}} = idem$. Выполнение $Fr = idem$ обеспечивается правильным заданием режима расхода и глубин на модели. Более сложно реализовать условие $E_{i_{тр}} = idem$, поскольку повышение уклонов на модели требует увеличения сопротивления русла за счет применения повышенной шероховатости. Однако, учитывая, что $i_{тр} = \frac{\tau_0}{\rho g R}$, критерий $E_{i_{тр}}$ можно представить в виде

$$E_{i_{тр}} = \frac{\tau_0}{\rho g R i_0} = \frac{\tau_0 \times l}{\rho g \omega l i_0} = \frac{P_{тр}}{P_b}. \quad (2)$$

Это означает, что $E_{i_{тр}}$ представляет собой отношение силы сопротивления к составляющей силы тяжести, которая ее преодолевает. Для расчета коэффициентов сопротивления существуют различные методы, описанные в литературе [1,3,4].

Оценка условий проведения модельных исследований, затрат на создание модели, цели моделирования и достоверности ожидаемого результата подтвердили допустимость осуществления исследований на модели с искажением планового и вертикального масштабов в 17 раз. В соответствии с этим плановый масштаб был принят равным 1:600, вертикальный — 1:35. Значительное различие планового и вертикального масштабов

($\frac{M_l}{M_h} = \frac{600}{35} \approx 17$) потребовало уточнить методику исследований по

сравнению с общепринятой на основе анализа топографии и характера растительности рассматриваемого участка реки и ее поймы.

На исследуемом участке пойма ровная и имеет весьма незначительные поперечные уклоны рельефа. Поэтому ее сжатие в поперечном направлении (при сохранении продольного и вертикального размеров неизменными) не может существенно исказить план течений потока и распределение осредненных скоростей по его глубине. В частности, для рассматриваемого случая $B = 3$ км (между дамбами обвалования) средняя глубина потока на пойме может быть не более $3 - 5$ м, т.е. $\frac{B}{h} \gg 6$.

Поскольку модель сжимается не только в поперечном, но и в продольном направлении (при сохранении неизменными вертикальных размеров), это уже существенно влияет на увеличение продольного уклона и искажение эпюр продольных скоростей. Для того чтобы средние характеристики течения: средние скорости и глубины в различных сечениях на модели, имеющей различный плановый и вертикальный масштаб, были подобны соответствующим характеристикам натурального потока, необходимо осуществить условия, при которых поток подчиняется основным масштабным соотношениям [1]:

$$M_v = \sqrt{M_h}; M_Q = M_l M_h^{3/2}; M_c = \sqrt{\frac{M_l}{M_R}} \quad (3)$$

К этим соотношениям следует присоединить еще масштаб уклонов M_i . Масштаб гидравлического радиуса можно записать через отношения масштабов площади живого сечения и смоченного периметра $M_R = \frac{M_\omega}{M_x} = \frac{M_l M_h}{M_x}$.

$$\text{Для широких русел } (B \gg h) M_R \approx M_h, M_x = M_l, M_c^2 = \frac{M_l}{M_h} = \frac{M_x}{M_h}, M_\lambda = \frac{1}{M_c^2} = \frac{M_h}{M_c}$$

Из изложенного выше следует, что при моделировании пойменного потока в рассматриваемом случае имеет место неравенство $M_{i_H} < M_{i_M}$. Поэтому

основной задачей обеспечения подобия средних характеристик течения на пойме является подбор соответствующей повышенной шероховатости. Более существенно влияние искажения планового масштаба на режим движения потока в русле реки. Это следует из соотношения $M_c = \sqrt{\frac{M_x}{M_B}}$, т.е.

масштаб сопротивлений определяется масштабами периметра и его глубины. Поперечное сжатие русла реки приводит к существенному изменению геометрии сечения с резким уменьшением отношения $\frac{B}{h}$ и как след-

ствие – к усилению тормозящего влияния на поток боковых стенок. Узкое русло имеет более высокую сопротивляемость движению потока (за счет более сильного влияния стенок и вторичных течений).

С учетом этого шероховатость русла модели подбиралась на основе данных натурных исследований о прохождении паводочного расхода 75% (251,5 м³/с), наблюдавшегося в 1977 г. Максимальный уровень весеннего половодья соответствовал началу выхода воды на пойму при среднем уклоне водной поверхности на участке реки $i = 0,000052$. На основании соответствующих этому случаю данных Q_M , λ_M и Re_M с помощью графика

$\lambda = f(Re, \frac{R}{\Delta})$ установлена относительная шероховатость моделируемого русла $\frac{R}{\Delta} = 16,0$, изготовленного из бетона с применением заполнителя из песка со средним диаметром частиц 0,18 см. При пропуске расхода $Q_H = 251,5 \text{ м}^3/\text{с}$ было установлено, что погрешность определения глубин на модели составляет не более 10% в пересчете на натуру.

Следующий этап модельных исследований потребовал изучения характера прохождения паводков с обеспеченностями менее 75%, т.е. при движении потока по пойме и при различных расстояниях между дамбами. Этот этап исследований был реализован на модели в двух сериях исследований: без растительности на пойме и с растительностью, которая была определенным образом смоделирована.

Физическая модель участка р. Припять в пределах максимального расстояния между дамбами 3 км выполнена из песка с последующим закреплением сформированных морфологических элементов поймы и русла слоем бетона толщиной 3 ÷ 5 см. Для создания рельефа поймы и русла использованы карты М 1:10000 и 1:2000, а также материалы топографической съемки, выполненной Союзгипромелиоводхозом.

Исследования влияния дамб обвалования на уровенный режим весенних половодий выполнены при расстояниях между дамбами 3,0, 2,0 и 1,5 км для максимальных расходов 0,1 ÷ 75% обеспеченности для естественных условий прохождения паводка, т.е. без дамб обвалования. Задание в исследованиях расходов менее 1% обеспеченности обусловлено неопределенностью возможных колебаний максимальных расходов из-за предполагаемого изменения условий прохождения паводков выше в.п. Коробы под влиянием проектируемых инженерных мероприятий.

Моделирование шероховатости поймы, покрытой на 74% кустарником различной плотности (высота до 3 ÷ 3,5 м), луговой растительностью и песчаными отложениями (26%), основывается на данных натурных и лабораторных исследований 1976–1978 гг. Основной их целью был подбор искусственной шероховатости на модели, при которой обеспечивалось бы подобие величины и распределения скоростей по высоте растительности на модели и в натуре.

Экспериментально было установлено, что шероховатость растительности поймы может моделироваться полиэтиленовой стружкой с различной плотностью ее укладки. Эксперименты также показали, что величины коэффициентов шероховатости в значительной степени зависят от глубины потока z на пойме (рис. 1), в частности подъем уровня воды до затопления растительности сопровождается увеличением коэффициента шероховатости в $1,5 \div 2,0$; дальнейшее увеличение глубины потока приводит к уменьшению коэффициента шероховатости, и при глубине потока, превышающей высоту шероховатости в 4–5 раз, коэффициент шероховатости остается постоянным.

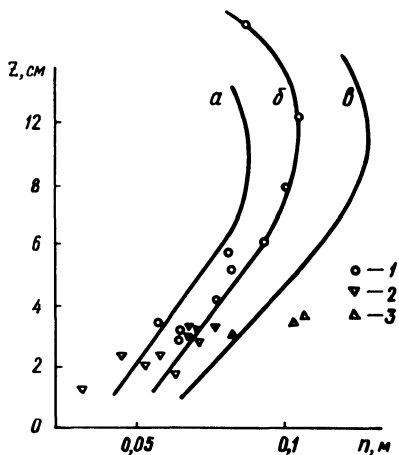


Рис. 1. Зависимость коэффициента моделируемой шероховатости n от глубины потока Z :

данные эксперимента : а — редкий кустарник, б — средней густоты, в — густой.

Натурные данные: 1 — редкий кустарник, 2 — средней густоты, 3 — густой.

В соответствии с этим для оценки коэффициентов искусственной шероховатости при малых глубинах потока ($1 \div 1,5$ м) использовались натурные данные о прохождении паводка 1978 г., а больших — данные измерения эпюр осредненных скоростей ветра в приземном слое воздушно-го потока в натуральных условиях (1977 г.) над кустарниковой растительностью.

Оценка возможных размывов поймы и откосов дамб обвалования выполнена путем расчета актуальных придонных скоростей (на основе модельных данных о средних на вертикалях скоростях) и сопоставления их с размывающими для данного грунта.

Из общих результатов оценки влияния дамб обвалования на режим прохождения половодий на исследуемом участке Припяти можно отметить следующее:

—при изменении расстояния между дамбами от 3 до 1,5 км среднее превышение уровня над естественным (при 1% обеспеченности) составляет от 1,0 до 2,0 м;

— растительность на пойме реки оказывает существенное влияние на уровеньный режим половодий, например, полное ее удаление приводит к среднему снижению уровней половодья (при 1% обеспеченности) на 1,0–0,5 м по сравнению с уровнем в естественных условиях;

— уменьшение междамбового расстояния вызывает увеличение русловой части расхода по сравнению с пойменной, вследствие чего повышение средних скоростей в русле больше, чем на пойме;

— на участках поймы, покрытых растительностью, где отсутствуют сосредоточенные течения (влияние рельефа местности и растительности), опасность размывов отсутствует при всех рассмотренных вариантах расположения дамб;

— при устройстве дамб обвалования из местных песков следует учитывать минимально допустимое приближение их к руслу реки и наличие сосредоточенных течений, обусловленных рельефом местности, наличием кустарника, устройством вдоль дамб траншей.

Л и т е р а т у р а

1. Л е в и И.И. Моделирование гидравлических явлений. — М.—Л., 1960.
2. Г и л я р о в Н.П. Моделирование речных потоков. — Л., 1973.
3. 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.
4. Справочник по гидравлике. — Киев, 1977.

УДК 532.57

В.П. Р о г у н о в и ч, А.А. О с и п о в и ч, Г.С. Ц а ц у к

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ОСРЕДНЕННОЙ СКОРОСТИ В ОДНОРОДНЫХ ПО ДЛИНЕ ПОТОКАХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Использование гипотезы о представлении поля продольных скоростей некоторой комбинацией полей скоростей двух плоских потоков [1,2,3] привело к удовлетворительному согласованию расчетных и экспериментальных данных [4]. Впервые аналогичное представление применительно к потокам прямоугольного поперечного сечения использовал В.Н. Гончаров [1]. Э.П. Коваленко, предложив [2,3] новую трактовку известного [1] гидравлического постулата о представлении потоков других форм сечений плоскими с глубиной, равной гидравлическому радиусу R , и шириной, равной смоченному периметру χ , установил взаимосвязь между полем продольных скоростей в потоке ограниченного сечения и полями скоростей в двух плоских потоках — плоском по вертикали и по горизонтали.

В статье предпринята попытка вывести формулу для расчета распределения продольного компонента осредненной скорости в однородных по