

А. В. Самойленко, Р. З. Газизянов, Б. Е. Байгалиев,  
А. В. Черноглазова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ РУСЕЛ КАНАЛОВ

*Ключевые слова:* гидравлическое сопротивление, пропускная способность, шероховатость.

*В статье разрабатывается расчет пропускной способности оросительных каналов, с применением новых теоретических зависимостей, учитывающих влияние откосов, формы и размеров поперечного сечения на пропускную способность русла.*

*Keywords:* hydraulic resistance, capacity, roughness.

*We develop a calculation capacity of irrigation canals, using new theoretical relations that take into account the influence of slope, shape and size of the cross section for the channel bandwidth.*

Оросительные каналы в процессе эксплуатации характеризуются значительным снижением пропускной способности, на которую непосредственное влияние оказывают деформации и шероховатость русла, его зарастание водной растительностью, режимы и условия эксплуатации. Все это приводит в конечном итоге к изменению значений коэффициентов шероховатости и гидравлических сопротивлений по сравнению с проектными данными в сторону увеличения, иногда в несколько раз. Поэтому недоучет указанных факторов может привести к потере гидравлической эффективности каналов, их эксплуатационной надежности при длительной эксплуатации и к снижению водоподдачи или к ее прекращению для многих водопотребителей.

Большинство существующих в настоящее время зависимостей [1,2], для определения гидравлических сопротивлений, основано на приведении равномерного потока любой формы к прямоугольному плоскому потоку без тормозящих боковых стенок, поэтому влияние формы русла оставалось до последнего времени неизученным. Если для естественных широких речных русел этот вопрос не столь существенный, то для ирригационных каналов трапецидальных сечений очень важно установить, как распределяются касательные напряжения трения и средние скорости течения на откосах и по дну русла, и как влияют откосы на пропускную способность.

Открытые русла чаще всего имеют значительную шероховатость и проектируются на относительно большие скорости, поэтому движение воды в них происходит преимущественно в области квадратичного сопротивления. Это обстоятельство приводит к необходимости поисков значений гидравлических сопротивлений, в зависимости от характера и состояния стенок русла канала, а также от геометрических размеров русла.

Для достижения поставленной цели решались следующие вопросы:

1. Разработка математической модели движения жидкости в трапецидальном русле канала;

2. Экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений на трех каналах Северного Кавказа;

3. Экспериментальные исследования влияния откосов на пропускную способность и гидравлические сопротивления модели трапецидального русла канала.

Проблемы влияния откосов на гидравлические сопротивления требуют изучения. Это связано с наличием многообразия влияющих факторов и сложности процессов, протекающих в руслах каналов трапецидального сечения.

Основной целью дальнейших исследований является изучение влияния бокового торможения на пропускную способность русел, особенно трапецидальных, которые получили наибольшее распространение на юге России.

Для решения задачи течения в трапецидальном русле численным методом, с учетом тормозящего влияния откосов был использован метод конечных элементов, основанный на методе Галеркина.

Сопоставление расчетного значения  $\lambda$ , полученного численным методом, с натурными данными на Бг-Р-7 показало, что коэффициент гидравлического трения очень близко совпадает (отклонение составляет 1,6%). Это позволяет считать численный метод достаточно точным для расчета гидравлических сопротивлений.

По результатам расчета были сделаны выводы о том, что для пространственного потока касательные напряжения и гидравлические сопротивления возрастают по сравнению с плоским, более чем на 10 % и что с увеличением ширины канала поток перестает быть пространственным, при  $b/h \geq 10$ .

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на модели трапецидального русла (рисунок 1), с шириной по дну  $b=0,24$ м и поверхностью (в соответствии со шкалой значений  $k_3$  для лабораторных моделей) гладкой, покрытой масляной краской, посыпанной, в свежем состоянии, песком диаметром зерен  $d = 0,7$ мм представлены ниже.

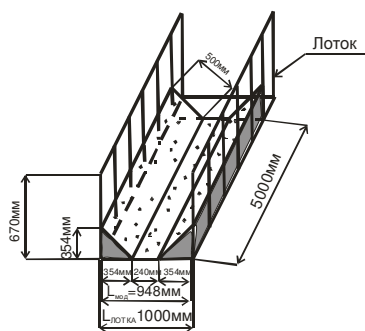


Рис. 1 – Схема модели трапецидального русла

При равномерном движении воды в каналах основными действующими силами являются силы трения и силы тяжести. Подобие сил трения обеспечивается при равенстве на модели и в натуре числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V\ell}{\nu} = idem \quad (1)$$

Подобие сил тяжести соблюдается при равенстве чисел Фруда на модели и в натуре:

$$Fr = \frac{V^2}{g\ell} = idem \quad (2)$$

где  $\nu$  - средняя скорость потока;  $\ell$  - характерный линейный параметр;  $\nu$  - коэффициент вязкости.

При использовании уравнения (1), необходимо, чтобы геометрическое подобие между натурой и моделью было распространено и на геометрические параметры шероховатости. С практической точки зрения это требование может оказаться неосуществимо для возможных размеров модели и по причине технических возможностей лаборатории. Кроме того в случае турбулентного течения нарушается справедливость уравнения (1), так как касательные напряжения трения будут уже представлены двумя составляющими, отвечающими ламинарному и турбулентному движению.

С другой стороны, одновременное соблюдение условий (1) и (2) возможно лишь при использовании на модели жидкости другой вязкости, чем в натуре, что практически неосуществимо, поэтому условие (1) соблюдается редко.

Моделирование равномерных потоков в каналах проводится исходя из обеспечения трех условий:

$$\begin{cases} Fr = idem \\ C = idem \\ i = idem \end{cases} \quad (3)$$

которые обеспечивают моделирование как сил тяжести (по числу Фруда), так и сил трения (по числу Рейнольдса).

При решении практических задач с использованием гидравлического моделирования представляют интерес оценки влияния вязкости как на средние по времени характеристики потока, так и характеристики турбулентности открытых потоков. Среди первых из них особое место занимают

коэффициенты гидравлического сопротивления (или коэффициенты гидравлического трения), которые, с одной стороны, сами по себе часто являются предметом исследования, а, с другой стороны, в некоторых задачах могут выступать в качестве параметра в связях между характеристиками потока и числом Рейнольдса  $Re$ .

При моделировании гидравлических явлений, происходящих под действием сил тяжести и сил сопротивления трения в квадратичной области сопротивлений, поступают следующим образом:

1. Создают русло модели, геометрически подобное натурному, включая геометрическое подобие шероховатости, при котором будет обеспечено равенство относительных шероховатостей для модели и природы:

$$\Delta_M / R_M = \Delta_H / R_H \quad (4)$$

2. В граничном сечении на модели, которое должно располагаться для спокойных потоков в конце моделируемого участка, а при бурном состоянии – в начале модельного русла, создают движение жидкости, кинематически подобное движению в натуре.

3. Дополнительно в граничном сечении создают условия, обеспечивающие равенство чисел Фруда для модели и природы.

В результате исследований, было установлено, что критерий Фруда влияет на характеристики потока через изменение формы границы потока. Если этот критерий на положение и форму свободной поверхности не влияет, то он не влияет и на другие характеристики течения. В критерий Фруда входят величины, составляющие условия задачи для потоков со свободными поверхностями, и формально только при  $Fr = idem$  уравнения, описывающие поверхность жидкости инвариантны. С позиций моделирования количественная оценка влияния числа Фруда весьма важна, так как лишь при наличии автомодельности по этому критерию указанное формальное требование может быть нарушено.

Значительное влияние свободной поверхности на сопротивление определенно проявляется при относительно больших числах Фруда  $Fr$ , когда свободная поверхность при равномерном в среднем движении существенно отличается от плоскости.

Выполнение на модели условия  $Re_M \geq Re_{ГР}$  при  $Fr = idem$  приводит к необходимости назначать весьма крупные геометрические масштабы. В связи с этим часто в литературе по гидравлическому моделированию содержатся рекомендации обеспечивать выполнение условия  $\lambda = idem$  за счет меньшей относительной шероховатости модели при отказе от соблюдения условия  $Re_M \geq Re_{ГР}$  [то есть отнесения модели к переходной или даже гладкостенной области зависимости  $\lambda = \lambda(Re)$ ]. Указанные рекомендации получают из описания равномерного течения.

При гидравлическом подобии равномерных потоков в открытых руслах (каналах), должны

соблюдаться все три условия (3). При этом достаточно обеспечить любые два из них, чтобы третье соблюдалось автоматически на основании уравнения для частного случая широкого прямоугольного русла:

$$i = \frac{V^2}{C^2 h} = \frac{Fr \cdot g}{C^2}, \quad (5)$$

или

$$C = \sqrt{\frac{Fr \cdot g}{i}}. \quad (6)$$

Из уравнения (19) можно записать, что

$$\frac{Fr}{i} = idem. \quad (7)$$

Представим (20) в виде

$$\frac{Fr}{i} = \frac{V^2}{g \cdot h \cdot i}, \quad (8)$$

тогда

$$\frac{V^2}{C^2 h} = \frac{C^2}{g} = \frac{8}{\lambda}. \quad (9)$$

Условие моделирования по числу Фруда приводит к соотношению скоростей на модели и натуре в виде:

$$\frac{V_M}{V_H} = \frac{1}{\sqrt{L}}. \quad (10)$$

К этому же соотношению приходим, исходя из условия подобия по коэффициенту Шези:

$$\frac{V_M}{V_H} = \frac{C_M \sqrt{R_M \cdot i_M}}{C_H \sqrt{R_H \cdot i_H}} = \frac{\sqrt{R_M}}{\sqrt{R_H}} = \frac{1}{\sqrt{L}}, \quad (11)$$

где  $C_M/C_H = 1$  и  $i_M/i_H = 1$ .

Поэтому при моделировании открытых русел (каналов), с неразрываемым ложем, необходимо создать на модели тот же уклон, что и в натуре, а шероховатость модели и ее масштаб подобрать таким образом, чтобы число Фруда на модели было равно числу Фруда в натуре. При этом будет обеспечиваться также равенство коэффициентов Шези модели и натуре.

Вопрос о правильном назначении шероховатости модели для обеспечения условия  $C_M = C_H$  должен решаться с учетом того, что на моделях, при сравнительно малых масштабах и относительно малых числах Рейнольдса, будет существовать в основном не квадратичный закон сопротивления, а докватричный в переходной области или закон сопротивления для гладких русел. При этом зависимость коэффициента  $C$  от числа Рейнольдса и, следовательно, от гидравлического уклона проявляется особенно сильно. В связи с этим расчет моделей следует вести по формулам, учитывающим влияние уклона на значение коэффициента Шези. К таким зависимостям можно отнести прежде всего обобщенную формулу А.Д. Альтшуля:

$$C = 24 \ell g \frac{2R}{k_3 + \frac{0,036}{\sqrt{R \cdot i}}}, \quad (12)$$

где  $k_3$  - эквивалентная шероховатость, мм;  $R$  - гидравлический радиус, мм;  $C$  - коэффициент Шези,  $m^{0,5}/c$ .

Учитывая моделирование по коэффициенту Шези  $C_M = C_H$  и зависимость (25), запишем:

$$\frac{2R_M}{k_{ЭМ} + \frac{0,036}{\sqrt{R_M \cdot i_M}}} = \frac{2R_H}{k_{ЭН} + \frac{0,036}{\sqrt{R_H \cdot i_H}}}. \quad (13)$$

Вводя обозначение  $R_H / R_M = L$  и соотношение  $i = i_M = i_H$ , после преобразований получим:

$$k_{ЭМ} = \frac{k_{ЭН}}{L} + \frac{0,036}{\sqrt{R_H \cdot i}} \left( \frac{1}{L} - \sqrt{L} \right), \quad (14)$$

где  $k_{ЭМ}, k_{ЭН}, R_H$  - в миллиметрах.

Из уравнения (14), в зависимости от выбранного масштаба модели  $L$ , устанавливаем значение необходимой шероховатости модели  $k_{ЭМ}$ , при которой будет иметь место условие  $C_H = C_M$  и, следовательно, возможен пересчет результатов по правилу Фруда. Масштаб модели определяется из условия сохранения турбулентного режима.

Моделирование производилось в лотке (длиной 6м, шириной 1м и высотой 0,67м), имеющем водослив-водомер Томпсона, для определения расхода. Дно лотка покрывалось металлическими листами на которые при помощи шурупов крепился каркас для откосов, который изготовлялся из деревянных брусков, предварительно покрашенных краской во избежание набухания древесины и, соответственно, создания неустойчивости всей конструкции. Откосы выполнялись из листов оцинкованного железа, размером 1000x500мм. Конструирование модели производилось непосредственно в лотке. После закрепления листов оцинкованного железа на деревянном каркасе, вся конструкция покрывалась слоем легконаплавляемого рубероида (технониколя), предварительно расплавленного при помощи газовой горелки.

Далее внутренняя поверхность модели покрывалась краской, на которую, посыпали, в свежем состоянии, песок диаметром зерен  $d = 0,7mm$

Рабочий участок находился на расстоянии 2,0м от начала и 1,0м от конца модели.

Для определения кинематических характеристик потока использовался измерительно-вычислительный комплекс, в состав которого входит микровертушка X-6, аналоговый частотомер, устройство сопряжения и персональный компьютер типа IBM PC.

Сервисное программное обеспечение комплекса позволило непосредственно в процессе исследований определять турбулентные характеристики потока - осредненные и актуальные скорости, дисперсию, стандарт пульсаций, закон распределения пульсационных скоростей, интенсивность турбулентности.

В лабораторных исследованиях был применен механический метод, заключающийся в определении скорости по силовому воздействию потока на рабочие органы приборов, в данном случае микровертушки, использующей принцип преобразования энергии потока в механическую энергию.

Подача воды к лабораторной установке осуществлялась при помощи насосов, качающих воду из основной емкости в водонапорный бак, а затем через диффузор в исследуемое русло модельного лотка. Для обеспечения равномерности движения потока на модели, в ее начале устанавливались сетчатые гасители, между которыми делалась гравийная засыпка.

Водонапорный бак оборудован водосливной воронкой для сброса лишней воды и поддержания постоянного напора в баке. Вход в лоток и его концевая часть оборудован задвижкой, позволяющей устанавливать нужную глубину потока и соответственно, за счет этого, дополнительно маневрировать скоростями движения воды в лотке. Через приемный бак, установленный в конце лотка, сбрасываемая вода снова поступает в основную емкость лаборатории.

Необходимый расход в опытах поддерживался по геометрическому напору на водосливе и напору в водомерном баке, из которого осуществлялась подача воды непосредственно на модель.

При проведении исследований на модели канала, ее поперечное сечение разбивалось на 5 створов. В створах замерялись следующие гидравлические параметры: глубина и скорость. Глубина потока замерялась шпигенмасштабом. При измерении скоростей использовалась микровертушка X-6, закрепленная на шпигенмасштабе.

Средняя скорость течения на вертикали определялась трехточечным способом по формуле:

$$U_B = (U_{0,2h} + 2U_{0,6h} + U_{0,8h})/4, \quad (15)$$

где  $U_{0,2h}$ ,  $U_{0,6h}$ ,  $U_{0,8h}$  - скорости в точках, на данной вертикали, на расстоянии от поверхности, соответственно, 0,2h, 0,6h, 0,8h.

Площадь живого сечения определялась аналитическим способом. Строился поперечный профиль модели канала с указанными на нем глубинами воды на вертикалях, расстояниями между ними. Площадь живого сечения определялась как сумма площадей между промерными вертикалями и урезами воды.

Смоченный периметр  $\chi$  определялся измерением длины линии дна модели канала на профиле, заключенной между урезами воды.

Гидравлический радиус  $R$  определяли по формуле:

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (16)$$

Расход определяли суммированием частичных расходов между скоростными вертикалями. Площадки между скоростными вертикалями определяли по данным промеров.

Полный расход определяли по сумме частичных расходов, протекающих через элементарные площадки:

$$Q = K \cdot V_{b_1} \cdot \omega_1 + \frac{V_{b_1} + V_{b_2}}{2} \cdot \omega + \dots + \frac{V_{b_{n-1}} + V_{b_n}}{2} \cdot \omega_n + K \cdot V_{b_n} \cdot \omega_{n-1}, \quad (17)$$

где  $K=0,7$  – коэффициент прибрежной зоны.

Коэффициент Шези вычислялся по формуле Агроскина:

$$C = \frac{1}{n} + 17,721gR', \quad (18)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла, который определяли из зависимости:

$$n = \frac{R^{2/3} \cdot I^{1/2}}{V}. \quad (19)$$

Коэффициент гидравлического трения вычислялся по формуле:

$$\lambda = \frac{8gRI}{V^2}. \quad (20)$$

Число Рейнольдса находилось, как:

$$Re = \frac{4VR}{\nu}, \quad (21)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ .

Экспериментальные исследования и полученные математические зависимости позволили обосновать необходимость учета тормозящего влияния откосов при проектировании и реконструкции ирригационных каналов.

В результате экономического расчета, получено обоснование эффективности применения разработанных методик учета тормозящего влияния откосов.

## Литература

1. Курганов А.М., Федоров Н.Ф.- Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Стройиздат. Ленинградское отделение, 1978, 570с.
2. Болграсский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. Высшая школа. Москва, 1975, 496с.
3. Б.Е.Байгалиев, А.В.Черноглазова, С.В. Темникова, А.В.Щелчков, И.Р. Тимербулатова, П.Э.Калмыков, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 10, 96-98 (2013).
4. Б.Е. Байгалиев, А.В.Черноглазова, С.В. Темникова, И.Р. Тимербулатова, Д.Р. Биктимиров, *Вестник Казанского технологического университета*, **14**, 7, 93-96 (2011).