

ЛИТЕРАТУРА

1. Р о г у н о в и ч В.П., В а п Ю.И., Б а м п и С.А., Ш н и п о в Ф.Д. Математическая модель системы водотоков бассейна р. Припять в естественном состоянии и при обваловании // Проблемы Полесья. — Вып. 8. — 1982. — С. 75—92. 2. К о в а л е н к о Э.П. Исследование движения воды в открытых руслах. — Минск, 1963. — 223 с. 3. Б а м п и С.А. Распределение скоростей в плоском равномерном потоке // Вопросы водного хозяйства Белоруссии. — 1965. — С. 129—136. 4. Р о г у н о в и ч В.П., Б о г д а н о в и ч М.И. Распределение продольных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хозяйство и гидротехн. стр-во. Минск. — 1983. — Вып. 13. — С. 63—71. 5. Б о г д а н о в и ч М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных открытых потоках неправильной формы поперечного сечения // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. Тезисы докл. 2-й Всес. конференции. М., 1984. — Т. 1. — С. 21—24. 6. V.P.R o g o u n o v i c h /U.S.S.R/: Mathematical Models of Water Motion in Channel Systems (I.C.N.M.C.O.F.W.R.E.A.). Bratislava, 1981.

УДК 532.543:62/41

В.П.РОГУНОВИЧ, Ф.Д.ШНИПОВ,
канд.-ты техн. наук (ЦНИИКИВР)

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЕЛ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Устойчивость русел земляных каналов в основном определяется величиной динамического воздействия на частицы подстилающего грунта движущегося турбулентного потока. Установлено [3], что в продольно-однородных потоках турбулентные характеристики и динамические усилия распределены по периметру неравномерно. Это объясняется трехмерностью поля осредненных скоростей: в каналах некруглой формы существуют небольшие (1—5 % от средней скорости) поперечные компоненты, образующие совместно с продольным стационарные течения с винтообразными линиями тока [1, 2]. Поперечные течения оказывают значительное влияние на распределение по сечению продольных скоростей и касательных напряжений, транспорт насосов, процессы перемешивания, аэрации, тепло- и массообмена. Существующие методы гидравлического расчета земляных каналов не учитывают влияние поперечного осредненного движения, а, следовательно, реально существующего распределения по периметру придонных характеристик. Это приводит к тому, что сечения, запроектированные по методам допускаемой средней скорости или влекущей силы, подвергаются деформациям, расширяются и мелеют; уменьшается надежность работы каналов, снижается их пропускная способность.

В статье представлены теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие влияние поперечных течений на устойчивость русел земляных каналов трапецеидальной формы сечения.

Поперечные компоненты осредненной скорости, создавая поле конвективных токов, зависящее от формы, размеров канала и распределения по сечению турбулентных напряжений, осуществляют концентрированный перенос импульса из зон с большими его значениями к размываемым границам потока, что приводит к перераспределению по периметру придонных скоростей и касательных напряжений на стенке. Измерения последних, выполненные

S.Ghosh, N.Roy [3] в трапецидальных каналах с различным заложением откосов и отношением поперечных размеров, показали, что максимальные значения τ_0 , как правило, находятся на боковых откосах и при заложении $m \geq 1$ на 10–100 % превышают среднее по периметру значение τ_0 . Применительно к условиям эксперимента [3] с помощью созданной математической модели трехмерного поля осредненных скоростей [4] рассчитаны поперечные компоненты скорости (рис. 1, а). Расчетные поперечные течения удовлетворительно объясняют экспериментальное распределение касательных напряжений: локальные максимумы τ_0 имеют место в зоне встречи нисходящих токов с жесткими границами, локальные минимумы – в зоне восходящих токов.

Для оценки влияния поперечных течений на распределение придонных характеристик в лабораторном лотке с помощью термоанемометрической системы постоянной температуры "DISA" выполнены совместные измерения поперечных компонентов и придонных осредненной и актуальной скорос-

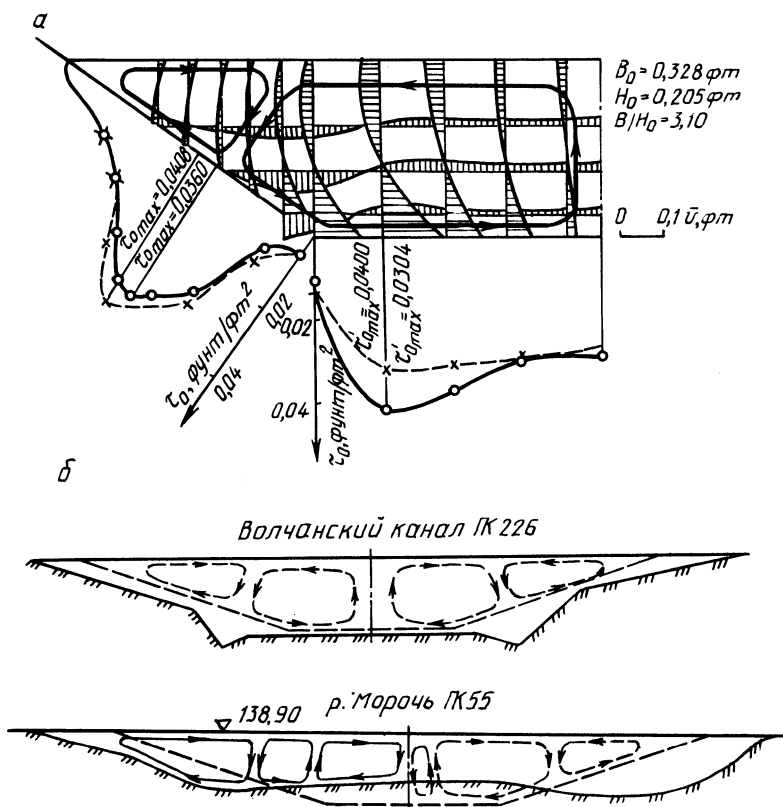


Рис. 1. Схема распределения по периметру локальных касательных напряжений (а) и механизм деформаций русел трапецидальных каналов (б): $\circ - \circ$ – касательные напряжения (эксперимент); \Rightarrow } – направление поперечных течений (расчет); - - - - - проектное сечение; /// – существующее сечение

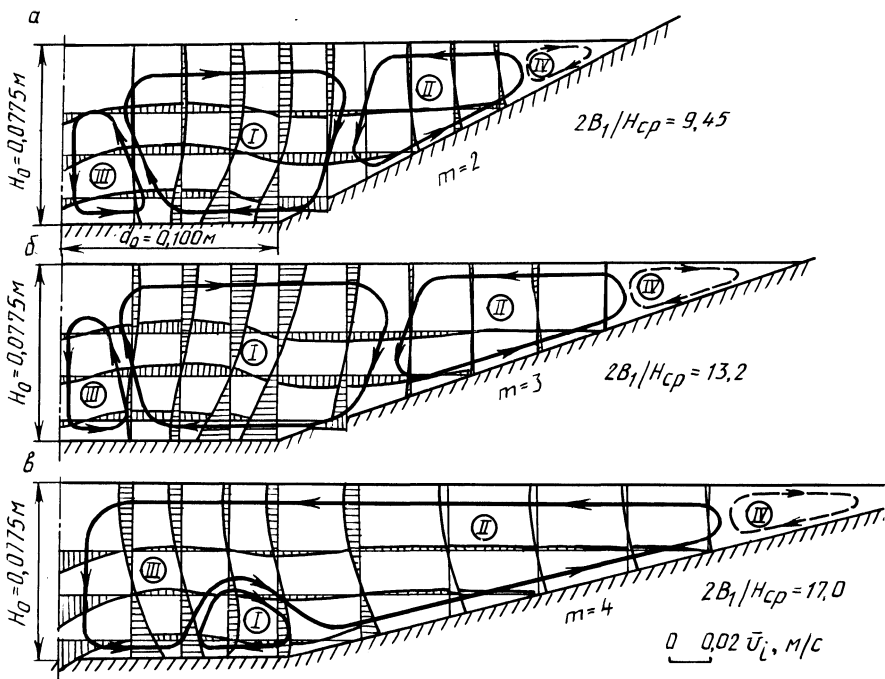


Рис. 2. Расчетное распределение \bar{v}_i ($i = 2, 3$) по [4] в каналах с различным заложением откосов и параметром формы:
 а) $m=2, \beta=9,45$; б) $m=3, \beta=13,2$; в) $m=4, \beta=17,0$

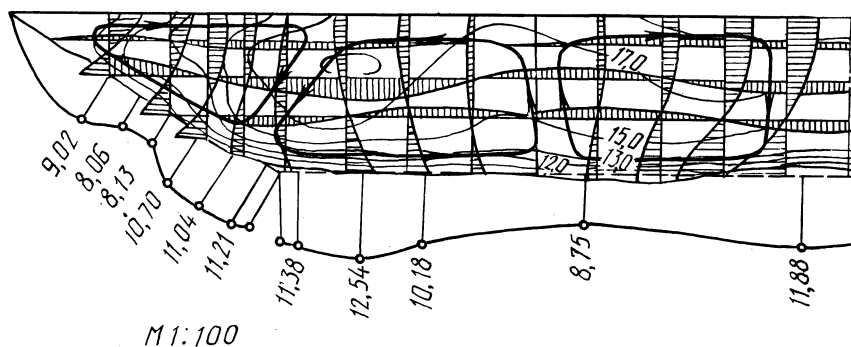
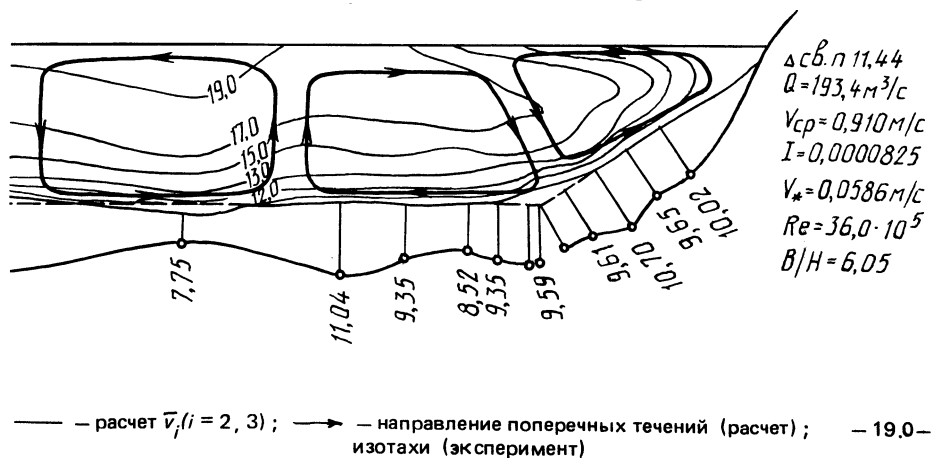


Рис. 3. План экспериментальных изоток и расчетное распределение поперечных скоростей в натурном канале:

тей (0,5 мм от жесткой границы) [5]. Получены аналогичные результаты: локальные максимумы \bar{V}_g и $V_{g,a}$ совпадают с зоной нисходящих токов поперечной циркуляции, локальные минимумы имеют место в зоне восходящих токов.

Поперечные течения, концентрированно доставляя к размываемым границам осветленную воду, создают в сечении области с дефицитом взвешенных наносов [6]. Опыты Н.П.Зрелова [7] и Л.Д.Козыренко [8] показали, что формирование отложений является "... не только функцией продольной скорости, но и внутренних винтовых течений". Минимум отложенных наносов наблюдается в углах сечения, максимум — в средней части канала. Линии равных концентраций взвешенных наносов ведут себя подобно изотактам — "прижаты" в углах сечения и выпуклы к середине потока у сторон [9]. Расчет изоплет без учета влияния поперечных течений приводит к результатам, значительно отличающимся от экспериментальных данных [9]. Таким образом, поперечные течения играют важную роль в транспорте взвешенных наносов, создавая в сечении области с их дефицитами, совпадающие с зонами локальных максимумов придонных скоростей и касательных напряжений на стенке.

Характерной чертой формирования русел прямолинейных земляных каналов является преобладающий размыв боковых откосов и повышение дна, вызванное отложением в этой области наносов [10]. Существование поперечных компонентов осредненной скорости позволяет объяснить такой механизм деформации сечений. Если на прямолинейном участке канала движение было бы параллельноструйным, то через некоторое время можно было бы ожидать стабилизации размыва, т.к. на место унесенной частицы грунта будут доставляться другие из соответствующих точек вышерасположенных сечений. Существование небольшого поперечного осредненного движения приводит к тому, что частицы грунта будут транспортироваться не только вдоль потока, но и перемещаться в поперечном направлении. Таким образом, устойчивость русла будет зависеть как от величины придонной скорости, так и в значительной мере от ее направления, особенно если учесть, что основной формой движения донных наносов являются качение и сальтация [11].



С помощью созданной математической модели трехмерного поля осредненных скоростей [4] выполнен расчет поперечных течений для проектных и существующих сечений канализованных рек Белоруссии (данные наблюдений за деформациями С.К.Ревяшко [12]), р. Морочи и Волчанского канала (данные Белгипроводхоза).

Установлено, что в проектных сечениях нисходящие токи поперечной циркуляции направлены на боковые откосы в район углов и размыв происходит в основном в области их встречи с размываемыми границами (рис. 1, б). Зона преимущественного отложения наносов совпадает с областью восходящих токов. В сформированном русле р. Морочи поперечные скорости направлены на горизонтальное дно и от основания откоса к урезу (рис. 1, б) — осредненное движение повышает устойчивость откосов.

Таким образом, влияние поперечных компонентов осредненной скорости на устойчивость русел земляных каналов значительно и может быть сформулировано в основных трех положениях:

поперечные течения концентрированно доставляют массы воды с поверхности потока к размываемым границам, что приводит в области нисходящих токов к увеличению, а в области восходящих токов — к уменьшению локальных придонных скоростей и касательных напряжений;

они концентрированно доставляют в области повышенных придонных скоростей и касательных напряжений осветленную воду, которая, насыщаясь наносами, перемещается в поперечном направлении, и в области восходящих токов происходит отложение взвешенных наносов;

они способствуют однообразному транспортированию в поперечном направлении данных наносов.

В зависимости от направления поперечных течений осредненное движение способствует повышению (придонные поперечные скорости \bar{V}_i направлены от основания откоса к урезу) или понижению (направление \bar{V}_i противоположное) устойчивости частиц грунта на откосах, а следовательно, устойчивости откосов и сечения. Поэтому при гидравлических расчетах устойчивых земляных каналов по методу допускаемой средней скорости выполнение условия: средняя скорость \bar{V} не превышает допускаемую V_0 — не является достаточным для обеспечения устойчивости сечения. Необходимо, чтобы русло имело такие параметры, при которых области максимальных придонных скоростей и касательных напряжений находились на горизонтальном дне, а поперечные придонные скорости были направлены от основания откоса к урезу и осредненное движение повышало устойчивость сечения.

С целью определения параметра формы $\beta = 2B_1/H_{cp}$ и угла заложения боковых откосов предельно-устойчивого сечения трапецеидального канала в мелкозернистых грунтах выполнены численные и экспериментальные исследования. С помощью математической модели [4] для канала с параметрами $2B_0 = 0,20$ м, $H_0 = 0,0775$ м при $m = 2, 3, 4$ (B_0 — полуширина по дну, H_0 — максимальная глубина) выполнены расчеты поперечных скоростей (рис. 2). При $m < 4$ и параметре формы $\beta = 2B_1/H_{cp} < 17$ (B_1 — полуширина потока поверху) в полусечении существует два основных вихря поперечной циркуляции (I, II), вызванных анизотропностью турбулентных напряжений, и два индуцированных (III, IV). При улоаживании откоса область и интенсивность основного вихря (II) увеличиваются поскольку зона анизотропности турбулен-

тных напряжений смещается на откос к урезу. В сечениях с $m \geq 4$ ($\beta \geq 17$) основной винт (I) уменьшается, охватывая лишь зону углов, а винты II и III объединяются, образуя циркуляцию с направлением поверхностных струй к оси симметрии, а придонных — вверх по откосу. В соответствии с ранее изложенным в трапециевидальном канале с $m \geq 4, \beta > 17$ максимальные значения придонных скоростей будут иметь место на горизонтальном дне и осредненное движение способствует повышению устойчивости откосов: сечение при $V \leq V_0$ будет сохранять общую устойчивость. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований на жесткой и размываемой моделях канала с параметрами: $2B_0 = 0,20$ м, $H_0 = 0,082$ м, $i_0 = 0,01$, $m = 4,3$, $\beta = 18$ (i_0 — уклон дна). Следует отметить, что полученные значения параметров предельно-устойчивых русел удовлетворительно согласуются с экспериментальными [10] и расчетными по гидроморфологическим зависимостям [13] данными.

Существование поперечных компонентов осредненной скорости позволяет с иных позиций объяснить наблюдаемую в опытах [14] и теоретически исследованную с помощью одномерных уравнений движения [15] неустойчивость потока в "большом". Поток в этом случае движется несколькими макроструями и оказывает неблагоприятное влияние на устойчивость русла: небольшие возмущения в состоянии вызвать перемещение гидродинамической оси к одному из откосов и, как следствие, размыв его и меандрирование русла. Поэтому целесообразно проектировать земляные каналы с одноструйным движением потока, когда максимальные значения турбулентных характеристик находятся на оси симметрии, возникшие в потоке возмущения гасятся и не способны значительно сместить гидродинамическую ось.

Поперечные течения, перераспределяя продольные скорости и вызывая появление в сечении нескольких локальных экстремумов, причем области максимумов совпадают с зонами нисходящих токов, а области минимумов — с зонами восходящих токов, и являются причиной неустойчивости потока в "большом" (рис. 3). Созданная математическая модель [4] позволила определить количество и положение макроструй (рис. 3) и установить, что при $25 > \beta > 17$ движение потока в трапециевидальных каналах, сложенных мелкозернистыми грунтами, осуществляется одной макроструей с максимумом турбулентных характеристик на оси симметрии.

Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили:

объяснить неравномерность распределения по периметру канала касательных напряжений и придонных скоростей, наблюдаемый механизм деформации русел, сформулировать основные положения влияния поперечных компонентов осредненной скорости на устойчивость каналов;

гидродинамически обосновать значения параметра формы и угла откоса предельно-устойчивых сечений трапециевидальных каналов в мелкозернистых грунтах;

установить предельные значения параметра формы, при которых поток устойчив в "большом" и движение его осуществляется одной макроструей.

ЛИТЕРАТУРА

1. О ф и ц е р о в А.С. Вторичные течения. — М., 1959. — 163 с. E i n s t e i n H.A. Li Secondary currents in straights channels // Transaktions Amer. Geophysical Union, 1958. —

V. 36. — N 6, pp. 1085—1088. 3. G h o s h S.N., R o y N. Boundary shear distribution in open channel flow // I. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1970.— Vol. 96.— N 4.— pp. 967—994. 4. Р о г у н о в и ч В.П., Ш н и п о в Ф.Д. Расчет поперечных течений в прямолинейных трапецидальных каналах с переменной по периметру шероховатостью // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев: Тез. докл. — 2-я Всес. конф. М., 1984. — С. 69—71. 5. Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальные исследования трехмерного поля осредненных скоростей и турбулентных напряжений в прямолинейных потоках трапецидального сечения // Гидравлика открытых русел. — М., 1984. — С. 108—114. 6. Р о з о в с к и й И.Л. О влиянии поперечных течений в потоке на движение взвешенных наносов // Вести ин-ту гидрол. и гидротехники АН УССР, 1963. — № 23 (60). — С. 71—75. 7. З р е л о в Н.П. Циркуляционные течения и осаднения наносов в каналах прямоугольного сечения // Тр. гидравл. лабор. М., 1959. — Вып. 7. — С. 221—262. 8. К о з ы р е н к о Л.Д. Вторичные течения и взвешивание наносов // Тр. Москов. инж.-строит. ин-та. — 1968. — Вып. 1. — № 55. — С. 93—102. 9. C h a o - L i n C h u i, H s i n g D.E. Secondary flow, shear stress and sediment transport // I. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. — 1981. — Vol. 107. — pp. 879—898. 10. М у х а м е д о в А.М., Ж у р а е в Т.Ж., И ш а н о в Х.Х. Исследование устойчивости русел больших каналов на крупномасштабных размываемых моделях. // Гидротехническое строительство. — 1983. — № 8. — С. 21—23. 11. Г р и ш и н Н.Н. Механика придонных наносов. М., 1982. — 160 с. 12. Р е в я ш к о С.К. Устойчивое на размыв поперечное сечение русла // Конструирование и расчеты осушительно-увлажнительных систем. — Минск, 1976. — Вып. 2. — С. 133—141. 13. А л т у н и н В.С. Мелиоративные каналы в землерычных руслах. — М., 1979. — 266 с. 14. К а д ы р о в А.А., Н у р и т д и н о в З., И р м у х а м е д о в Р. Натурные исследования параметра формы и предельных скоростей течения в Кызылкумском магистральном канале // Сб. науч. тр. САНИИРИ. — Ташкент. — Вып. 168. — 1983. — С. 129—143. 15. В о й н и ч - С е н о ж е н ц к и й Т.Г. Проблема устойчивости течения потока реальной жидкости в каналах конечной глубины // Изв. Тбилисского НИИ сооружений и гидроэнергетики. — 1966. — Т. 16. — С. 18—38.

УДК 532.5

В.И.КРИЧКО (ЦНИИКИВР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ПОТОКОВ НА РАЗМЫВАЕМЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

При проектировании каналов большой протяженности, например, каналов переброски, а также различного рода перепусков приходится решать задачу пересечения ими естественных водотоков. Пропуск воды через пересекаемый водоток осуществляется обычно дюкерами и акведуками. Однако, если разность отметок уровней воды пересекающихся водотоков незначительна, то наиболее рациональными являются узлы пересечения со смешением потоков. Последние почти не используются в гидротехнической практике. Это объясняется недостаточной изученностью взаимодействия пересекающихся потоков.

Большинство работ отечественных и зарубежных авторов посвящено частным случаям пересечения потоков — их слиянию и разделению, что не дает полного представления о характере явлений, возникающих в узле пересечения [1—5]. Особого внимания заслуживают рекомендации [1, 2] для случая пересечения открытых потоков при изменении расстояния между центрами узлов слияния и разделения (база пересечения), где дается расчет скоростей по границе течения и базы пересечения, основанный на применении методов теории функций комплексного переменного. В настоящее время отсутствуют ме-