

Эффект от модернизаций технологий, проведенных предприятиями по уменьшению содержания кадмия, на приёмной камере КОС составит 34,23 %, при этом концентрация кадмия после модернизаций на приёмной камере КОС составит 0,00178 мг/л, а на выходе из КОС 0,00089 мг/л. Капиталовложения на модернизации технологий составят 5470702 руб.

Содержание свинца в сточных водах рекомендовано уменьшить ОАОФПГЦК «Сибагромаш» на 64 %; ЗАО «Рубцовский молочный завод» на 76 %; ОАО «Мясокомбинат» на 73 %; АОЗТ «Рубцовская мебельная фабрика» на 82%.

Модернизация технологического процесса предприятий по уменьшению содержания свинца обеспечит снижение его концентрации в приёмной камере КОС на 13,41 %. При этом концентрация свинца на приёмной камере КОС составит 0,03377 мг/л, а на выходе из КОС 0,02702 мг/л. Капиталовложения на модернизации технологий предприятий по уменьшению содержания свинца определяются в размере 4428000 руб.

Общие капиталовложения на модернизацию предприятий составят 898702 руб.

Выводы

Реализация вышеизложенных рекомендаций позволит привести содержание загрязняющих веществ к нормам ПДК для хозяйственно-питьевого водоснабжения и без ограничений использовать сточные воды г. Рубцовска для орошения. При этом модернизация технологических процессов предприятий будет проведена с наименьшими затратами.

ГИДРОТЕХНИКА И ГИДРАВЛИКА

УДК:657.152.12

К ВОПРОСУ О ПОВРЕЖДЕНИЯХ ДОННЫХ РАССЕИВАЮЩИХ ВОДОВЫПУСКОВ СБРОСНЫХ ВОД С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТОЯКАМИ

Т. Г. Войнич-Сяноженцкий, д.т.н., М. А. Вольнов, к.т.н.
ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

Среди различных конструкций донных водовыпусков сточных вод в реки-стокоприемники одним из наиболее эффективных конструктивных решений, способствующих разбавлению вод, являются водовыпуски с Г-образными выпускными патрубками на вертикальных стояках, смонтированных на горизонтальном коллекторном трубопроводе, нормальном к оси речного потока. Вместе с тем, эти рассеивающие водовыпуски, функционирующие практически непрерывно (в осенне-зимний период при ледоставе и весной в период ледохода), подвержены серьезным динамическим и статическим нагрузкам, приводящим к повреждениям, а во многих случаях - к разрушениям.

Распространенным видом повреждения водовыпуска является срезка его вертикальных стояков перемещающимися и подныривающими ледовыми пластами, образуемыми при нарушении сплошного ледового покрытия при ледоходе или ледоставе. Другая разновидность аварий вызвана образованием трещин по нижней окружности коллекторного трубопровода или полного его разрыва из-за прогиба под собственным весом вследствие возникновения под трубопроводом области локальных размывов речного русла – промоин. В пределах промоины исчезает реактивная сила грунта, т. е. обнуляется сила противодействия грунтового дна русла, представляющего Винклерово основание.

При возникновении таких аварий сточная вода выливается через полости разрыва или трещины, увеличивая область локального размыва, а рассеивающий водовыпуск превращается в локальный выпуск сточной воды у дна, с сильным загрязнением придонной речной области. Подобные локальные загрязнения губительно воздействуют на взрослые особи и рыбную молодь, особенно при наличии в сточной воде таких токсичных веществ как формальдегид и метанол (наибольшие концентрации, как правило, присутствуют в сточных водах бумажно-древесных комбинатов, химико-технологических и нефтехимических предприятий).

В связи с отмеченным, существенное значение приобретает разработка конструкций и компоновочных решений рассеивающих водовыпусков со стояками и патрубками, выдерживающих удары подныривающих ледяных пластов, а также коллекторных водоводов, прочностные свойства которых способны противостоять угрозе разрушения при образовании под ними размывов речного дна.

В настоящей статье предпринята попытка определить некоторые нагрузки и воздействия на рассеивающий водовыпуск, находящийся на дне реки. Рассматривается случай ударного воздействия подныривающей льдины на стояк (с Г-образным выпускным патрубком). Пусть высота и диаметр вертикального стояка, соответственно $H_{ст}$ и d [м], а в его вершину ударяет пласт льда весом $G_л$ [кг] с площадью контакта $h_л \cdot d$ [м²]. Тогда силовое воздействие ледового пласта на консоль (вертикальная часть стояка с патрубком) определяется формулами сопротивления материалов [1]. Изменения изгибающего момента и поперечной силы по высоте стояка z определяются соотношениями:

$$M = \frac{G_л \times h_л^2}{2H_{ст}} \times \frac{a z^2}{\xi h_л^2} - \frac{1}{3} \frac{z^3}{h_л^3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}, \quad (1)$$

$$Q = - \frac{G_л \times h_л}{2H_{ст}} \times \frac{a z}{\xi h_л} - \frac{z^2}{h_л^2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}. \quad (2)$$

Очевидно, что опасным является сечение сопряжения вертикального стояка с горизонтальным коллектором. Наибольшее значение изгибающего момента и перерезывающей силы в основании консоли равны опорным реакциям и определяются выражениями:

$$M_{опор} = \frac{h_л \times G_л}{2 \times H_{ст}} \times \frac{a}{\xi} H_{ст} - \frac{h_л}{3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{\text{опор max}} = \frac{\mathbf{G}_л \times \mathbf{h}_л}{2\mathbf{H}_{\text{ст}}} . \quad (4)$$

Приведенные соотношения справедливы для случаев статического воздействия и для учета динамического приложения нагрузки должны быть дополнены. Наиболее просто и обоснованно эффект динамического приложения нагрузки можно учесть через коэффициент динамичности [1]:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_л^2}{\mathbf{g} \times \mathbf{P}_{\text{ст}}} \times \frac{\mathbf{EF}}{\mathbf{H}_{\text{ст}}}} , \quad (5)$$

где \mathbf{EF} - жесткость опорного сечения стояка; $\mathbf{P}_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка (в нашем случае $\mathbf{P}_{\text{ст}} = \mathbf{R}_{\text{опор max}} = \frac{\mathbf{G}_л \times \mathbf{h}_л}{2\mathbf{H}_{\text{ст}}}$ из (4))

Подстановка $\mathbf{P}_{\text{ст}}$ из (4) в (5) дает для коэффициента динамичности:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_л^2}{\mathbf{g} \times \mathbf{h}_{\text{ст}}} \times \frac{\mathbf{EF}}{\mathbf{G}_л}} , \quad (6)$$

где: $v_л$ – скорость удара льдины о стояк, которую естественно принять равной сумме скорости стационарного течения речного потока v_p и скорости волны половодья, примерно равной скорости Лагранжевой длинной волны:

$$v_л = v_p + \sqrt{\mathbf{gH}} = v_p + \sqrt{\mathbf{g} \times \frac{\omega_p}{\mathbf{B}_p}} , \quad (7)$$

где: ω_p – площадь поперечного сечения речного потока;

\mathbf{B}_p – ширина речного потока по верху.

Тогда с учетом (5)-(7) изгибающий момент в опорном сечении стояка будет определяться соотношением:

$$M_{\text{опор.дин.}} = K_d \frac{\mathbf{h}_л \times \mathbf{G}_л}{2 \times \mathbf{H}_{\text{ст}}} \times \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{e}} \mathbf{H}_{\text{ст}} - \frac{\mathbf{h}_л}{3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{v_л^2}{\mathbf{g} \cdot \mathbf{h}_л} \cdot \frac{(\mathbf{EF})}{\mathbf{G}_л}} \right) \cdot \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{e}} \mathbf{H}_{\text{ст}} - \frac{\mathbf{h}_л}{3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{\mathbf{h}_л \times \mathbf{G}_л}{2 \times \mathbf{H}_{\text{ст}}} . \quad (8)$$

Второе слагаемое под радикалом в (8) значительно больше единицы, тогда (8) преобразуется в:

$$M_{\text{опор.дин.}} = \left(v_p + \sqrt{\mathbf{g} \times \frac{\omega_p}{\mathbf{B}_p}} \right) \times \frac{\mathbf{E}_{\text{ст}} \times \mathbf{F}_{\text{ст}}}{\sqrt{\mathbf{gh}_л}} \cdot \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{e}} \mathbf{H}_{\text{ст}} - \frac{\mathbf{h}_л}{3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{\mathbf{h}_л \times \mathbf{G}_л}{2 \times \mathbf{H}_{\text{ст}}} \quad (9)$$

или

$$M_{\text{опор.дин.}} = \frac{\mathbf{E}_{\text{ст}} \times \mathbf{F}_{\text{ст}} \times \mathbf{G}_л}{2\mathbf{H}_{\text{ст}}} \times \sqrt{\frac{\mathbf{h}_л}{\mathbf{g}} \times \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{e}} \mathbf{H}_{\text{ст}}} - \frac{\mathbf{h}_л}{3} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times \left(v_p + \sqrt{\mathbf{g} \times \frac{\omega_p}{\mathbf{B}_p}} \right) . \quad (10)$$

Если учесть, что для стали $\mathbf{E} \cong 2 \cdot 10^6$ кг/см², то нетрудно понять, что подобная динамическая нагрузка легко срезает выпускные стояки с Г-образными патрубками, что и наблюдается на многих из построенных объектов, после чего, по существу, работает не рассеивающий водовыпуск, а оставшиеся после срезки льдом отверстия подводящего коллектора.

Как уже отмечалось выше, подводящие коллекторы часто разрываются из-за подмыва их основания речным потоком. Вкратце остановимся на механизме этого явления, которое в доступной нам технической литературе не рассмотрено.

Причина подмыва речного дна под проложенным перпендикулярно русловой оси коллекторным водоводом, приводящая к его разрыву, становится ясной после рассмотрения особенностей обтекания поперечного цилиндрического тела речным потоком. Прежде всего следует отметить, что в большинстве случаев коллектор укладывается на речное дно без подготовки основания под ним. Надежное основание, например из бетонных плит, уложенных на сваи, как правило, не применяется из-за высокой стоимости подводных работ.

Прокладка трубопровода по неподготовленному основанию сопровождается пересечением естественных неровностей поверхности речного дна и приводит к неизбежному образованию полостей. Через эти полости протекает небольшое количество речной воды, но скорости истечения вполне достаточны для выноса мелкофракционных гранул речного аллювия и постепенного увеличения этих полостей, особенно в период половодий. Процессу способствует также образование за трубопроводом отрывной зоны, с пониженным давлением, а градиент давления при переходе от области лобового обтекания к водоворотной области возрастает, увеличивая скорость истечения и, соответственно, размеры промоины.

В результате разрастания промоин металлический коллекторный водовод из цилиндрической балки на сплошном упругом основании превращается в многопролетную балку с дискретными опорами. Гидродинамическая особенность обтекания такой цилиндрической балки состоит в том, что за ней возникает система отрывных вихрей, точнее цепочки вихрей по верхней и нижней граням, так называемые цепочки Бенара - Кармана [2].

Точное гидродинамическое решение в этом случае приводит к следующему выражению для удельной силы лобового сопротивления, с которой поток воздействует на горизонтальное цилиндрическое тело:

$$R_w = \rho \times l \times v^2 \left(0,794 \frac{u}{v} - 0,314 \frac{\Gamma}{v} \frac{u}{v} \right) \quad (11)$$

где: v - скорость набегающего потока;

$u = \frac{\Gamma}{2l} + \frac{\pi h}{l} \frac{\Gamma}{l}$ - скорость перемещения вихревых цепочек;

Γ - интенсивность вихрей в области промоины, длиной L ;

l - расстояние между вихрями.

Нетрудно видеть, что соотношение (11) для силы R_w имеет нулевое значение при $\frac{u}{v} = 0$, а также при $0,794 = 0,314 \frac{u}{v}$, т. е. при $\frac{u}{v} \approx 2,44$.

Это означает, что R_w имеет максимум, который определяется из условия:

$$\frac{dR_w}{d\tilde{u}} = 0, \text{ где } \tilde{u} = \frac{u}{v}. \quad (12)$$

Условие (12) дает для \tilde{u} значение $\tilde{u} = 1,23$, которое после внесения в (11) приводит к соотношению:

$$R_w = 0,4 \rho v^2 l \quad (13)$$

С учетом того, что устойчивость вихревых цепочек Кармана имеет место только при $\frac{h_k}{l} = 0,28$ [2], где h_k - расстояние между центрами верхней и нижней

цепочки, (13) записывается в форме (при замене h_k через D – диаметр цилиндрического коллектора):

$$R_w = 1,4 \rho D v^2 \quad (14)$$

где: 1,4 – наибольшее значение коэффициента лобового сопротивления при вихревом обтекании.

Наличие вихревой цепочки за обтекаемым коллектором неизбежно должно интенсифицировать взвешивание мелких фракций речных наносов и их вынос вниз по течению и приводить к постепенному нарастанию промоин.

Использование (11) для получения соотношения (13) основано на решении, полученном Т. Карманом и подробно изложенном в [2]. Это решение базируется на уравнениях гидромеханики идеальной жидкости и не учитывает эффект турбулентной вязкости.

В [3] приводится решение для обтекания цилиндра вязкой жидкостью, данное классиком гидромеханики Г. Ламбом еще в 1911 г. Это решение, обобщенное на условия обтекания турбулентным потоком коллектора рассеивающего водовыпуска, записывается в форме:

$$R_w = \frac{8\pi v_T v \rho}{1 - 2\ln\left(\frac{1}{4} R_e\right)}, \quad (15)$$

где: v_T – турбулентная вязкость;

v – скорость потока;

ρ – плотность воды;

R_e – число Рейнольдса.

При использовании соотношения $v_T = \chi v_* l_T$, где v_* – динамическая скорость, l_T – линейный масштаб турбулентности и $\chi = 0,4$ – константа Кармана, вместо (15) получим:

$$R_w = \frac{8\pi \times \rho \times v_* \times l_T \times d \times v}{1 - 2\ln\left(\frac{R_e}{4}\right)} \quad (16)$$

Как и в соотношении (14) значение скорости v следует принимать согласно зависимости (7), что с учетом равенства $v_* = \frac{v\sqrt{g}}{C_{ш}}$ указывает как на близость зависимостей (15) и (16), так и на весьма существенное силовое воздействие потока на обтекаемый коллектор. Это воздействие в равной степени передается на русловое основание, материал которого выносится из промоины, и приводит к локальным исчезновениям реактивной силы основания и излому коллектора.

Скорость в щели промоины под коллектором v_6 можно определить, если написать уравнение Бернулли для створа речного потока перед коллектором и для сечения щели промоины шириной δ :

$$\frac{v_D^2}{2g} + D = \frac{v_d^2}{2g} + d + h_w, \quad (17)$$

где: v_D – скорость придонного слоя речного потока толщиной, равной диаметру коллекторного водовода D ;

h_w – потеря напора в пределах длины d вымоины.

Тогда:

$$v_d = \sqrt{\frac{v_D^2}{2g} + D - (d + h_w)} \quad , \quad (18)$$

откуда становится понятным (в виду малости суммы $\delta + h_w$ по сравнению с D), что V_δ всегда больше V_D и больше скорости, достаточной для размыва речного дна под коллектором.

Литература

1. Писаренко Г. С. и др. Справочник по сопротивлению материалов. Киев 1975.
2. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. Н. Теоретическая гидромеханика; Часть 1. М. 1956
3. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М. 1955.

УДК:657.152.12

К ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД, ПОСТУПАЮЩИХ В РЕКУ ИЗ ПРИДОННЫХ РЕЧНЫХ ВОДОВЫПУСКОВ

М. А. Воынов, к.т.н.

ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

В соответствии со стремлением нанести минимальный вред речной экосистеме при сбросе отходов промышленных предприятий часто используются донные водовыпуски [1]. В большинстве случаев объемный вес сбрасываемых в реку сточных вод бывает несколько меньше объемного веса речной воды. При этом струи сточных вод, выпускаемых из водовыпусков в направлении общего течения реки, постепенно расширяются, всплывая в верхние слои речного потока, что способствует их интенсивному разбавлению. Однако в практике проектирования речных придонных водовыпусков фактор всплытия струй обычно не учитывается, хотя это ощутимо способствует интенсификации разбавления в связи с более высокими значениями скоростей в верхних слоях речного потока.

В настоящей статье дается гидродинамический анализ процесса разбавления в речной воде струй сточных вод, выпускаемых из донных, точнее придонных водовыпусков, и уточняются расчетные зависимости. Анализ базируется на классическом уравнении переноса примеси Фика – Фурье [2, 3], которое распространяется на перенос неконсервативного вещества с интенсивностью распада k (размерность $[k] = t^{-1}$).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - KC \quad , \quad (1)$$

где: C – концентрация загрязняющей примеси сточной воды;

D – коэффициент турбулентной диффузии;

K – коэффициент деструкции загрязняющей примеси;

U – конвективная скорость течения.

Интегрирование уравнения (1) по поперечному сечению речного потока по способу Буссинеска [3,] приводит к уравнению:

$$\int_w \frac{\partial}{\partial t} \cdot Cdw + \int_w \frac{\partial(CU)}{\partial x_i} \cdot dw = \int \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \cdot dw - k \int C \cdot dw. \quad (2)$$

Последующее интегрирование вдоль продольной координаты x позволяет свести уравнение (2) к одномерному уравнению, являющемуся уравнением с одной степенью свободы и наиболее удобным для решения практических задач:

$$\frac{d(\bar{C}W)}{dt} = C_p Q_p + C_{cr} Q_{cr} - \bar{C}kw - \bar{C}(Q_p + Q_{cr}). \quad (3)$$

где: W – объем загрязненной речной воды со средней по объему концентрацией \bar{C} ; C_p – концентрация загрязняющей примеси (в частном случае, при отсутствии загрязняющего биохимического вещества $C_p=0$).

Второе слагаемое правой части уравнения (3) это поток загрязняющего вещества, поступающего из водовыпуска сточных вод. Третье слагаемое - деструкция загрязняющей примеси из-за биохимических процессов. Последнее слагаемое это суммарный расход реки и сточной загрязненной воды.

Интегрирование уравнения (3) позволяет получить расчетную зависимость для концентрации C в объеме воды (речной и сточной) в функции от времени, а зная скорость течения речного потока, и в функции от расстояния. Очевидно, что в общем случае объем W также является переменным и уравнение (3) должно быть дополнено уравнением для W .

Это уравнение также должно основываться на уравнении неразрывности Сен-Венана:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (4)$$

где q_i – интенсивность боковой приточности к реке поверхностных и грунтовых вод.

Интегрируя (4) по x получаем:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L w dx - w_L \frac{\partial L}{\partial t} + Q = q_i L \quad (5)$$

или

$$\frac{\partial W}{\partial t} - w_L \frac{\partial L}{\partial t} + Q = q_i L, \quad (6)$$

где: L - значение x до некоторого створа $x = L$ такое, что (5) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial W}{\partial t} - w_L u_L + Q = q_i L. \quad (7)$$

Если учесть, что $w_L v_L$ это расход реки Q_L на фиксированном расстоянии L от водовыпуска, то (7) в свою очередь преобразуется к форме:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = q_i L + Q_L - Q. \quad (8)$$

При $Q = \text{const}$ интегрирование уравнения (8) даст для W формулу:

$$W = (q_i L + Q_L - Q) \cdot t + \text{const}, \quad (9)$$

где постоянная интегрирования может определяться для загрязненной струи из нулевых начальных условий, давая значение $\text{const} = 0$ и позволяя исключить W из уравнения (3).

Подставляя W из (9) в основное уравнение (3), получим:

$$\frac{d}{dt} \left[\bar{C}(q_i L + Q_L - Q) \cdot t \right] = C_p Q_p + C_{cm} Q_{cm} - \bar{C} \left[Q_p + Q_{cm} + k(q_i L + Q_L - Q) \cdot t \right] \quad (10)$$

Это довольно громоздкое уравнение упрощается при рассмотрении постоянных по времени расходов, в частности меженных, когда наиболее сильно проявляется влияние сточных вод на качество воды в реке. Уравнение (10) в компактной форме представим в виде:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} + \frac{A + D + ktA}{At} \bar{C} = \frac{B}{At} \quad (11)$$

где:

$$\begin{aligned} A &= (q_i L + Q_L - Q), \\ B &= C_p Q_p + C_{cm} Q_{cm}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$D = Q_p + Q_{cm}.$$

Уравнение (11) линейное и его решение записывается в форме:

$$\bar{C} = e^{-\int \frac{A+D+ktA}{At} dt} \left\{ E + \int \frac{B}{At} e^{\int \frac{A+D+ktA}{At} dt} dt \right\} \quad (13)$$

Вычисление интегралов однако встречает серьезные трудности. Получение аналитического решения (13) в завершённом виде невозможно. По этой причине для уравнения (10) используется прием непосредственного интегрирования по приближенному способу Лагранжа.

Записывая уравнение [10] в виде:

$$\frac{d}{dt}(At\bar{C}) = B - \bar{C}(D + Akt) \quad (14)$$

и интегрируя его, получим:

$$\int d(At\bar{C}) = \int B dt - \int \bar{C}(D + Akt) \cdot dt \quad (15)$$

или, что то же

$$At\bar{C} = Bt - \int \bar{C}(D + Akt) \cdot dt + const. \quad (16)$$

Уравнение (16) с использованием приема Лагранжа, преобразуется к виду:

$$At\bar{C} = Bt - \int d[\bar{C}(D + Akt)t] + \int t d[\bar{C}(D + Akt)] \quad (17)$$

и далее, в последнем слагаемом [17] осредняя t , получаем

$$At\bar{C} = Bt - \int d \left[\bar{C}(D + Akt) \frac{t}{2} \right] + const, \quad (18)$$

где: $t/2$ - среднее значение t , выносимое из-под знака интеграла. После этого предпоследнее слагаемое в (18) вычисляется сразу и его решение записывается в форме:

$$At\bar{C} + \bar{C}(D + Akt) \frac{t}{2} = Bt + const, \quad (19)$$

$$\text{или } \bar{C} = \frac{2Bt + const}{2At + (D + Akt)t} \quad (20)$$

Из структуры зависимости [20] следует, что константа интегрирования должна быть равна нулю, т.к. в противном случае начальное условие будет давать нереальное значение для \bar{C} .

Итак, решение в принятых стилизациях рассмотренного сложного процесса приводит к зависимости:

$$\bar{C} = \frac{2B}{2A + D + Akt} \quad (21)$$

или с учетом обозначений для А, В и D к виду:

$$\bar{C} = \frac{2(C_p Q_p + C_{cm} Q_{cm})}{(q_i L + Q_L - Q)(2 + kt) + (Q_p + Q_{cm})} \quad (22)$$

Соотношение (22) в большинстве случаев может быть упрощено, если принять $Q_L = Q$, т.е. зафиксировать расход Q. Характерным является уменьшение концентрации биохимического загрязнения с ростом t в полном соответствии с физикой процесса и многочисленными данными наблюдений.

При $Q_L = Q$, выражение (22) приобретает компактный вид:

$$\bar{C} = \frac{2(C_p Q_p + C_{cm} Q_{cm})}{(2 + kt)q_i L + (Q_p + Q_{cm})} \quad (23)$$

Из (23) видно, что и деструкция, и боковая прочность способствуют уменьшению концентрации загрязняющих веществ в речном потоке.

Литература

1. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод. ГГИ, М. 1984.
2. Родзилер И. Д. Прогноз качества водоемов - приемников сточных вод М. Стройиздат 1984.
3. Войнич – Сяноженцкий Т. Г., Майроновский Ф. Г. и др. Методика прогнозирования качества поверхностных вод в условиях интенсивного освоения водосборов. Труды V Всесоюзного гидрологического Съезда. Том 5. Ленинград. Гидрометеиздат 1991.

УДК: 627.152.121

О ПЛОСКОСТИ РАЗДЕЛА РАДИАЛЬНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ РЕЧНОГО ПОТОКА НА ИЗЛУЧИНЕ

М.А. Волынов, к.т.н.

ГНУ ВНИГиМ, Москва, Россия

Задача определения положения плоскости раздела представляется в практическом отношении актуальной, т.к. позволяет оценить интенсивность перемещения масс воды и наносов в поверхностной зоне руслового потока от выпуклого берега к вогнутому и обратно в нижнем слое потока.

В работе [1] в результате гидродинамического анализа течения в излучине реки получено расчетное выражение для радиальной составляющей скорости циркуляционного течения в поперечном сечении потока

$$u_r \approx \frac{\bar{u}_j H C_{uu}}{nf \cdot r \sqrt{g}} \left[\left(\frac{z}{H} \right)^n + 6n \frac{z}{H} - 3n \left(\frac{z}{H} \right)^2 - 1 \right], \quad (1)$$

где: j , r , z – продольная, радиальная и вертикальная координаты;
 u_j, u_r, u_z – продольная и радиальная составляющие осредненной скорости;
 g – ускорение силы тяжести;
 r – радиус плановой кривизны;
 H – глубина потока;
 z – вертикальная координата, направлена от дна русла вверх.
 $\alpha = 0.4$ – постоянная Кармана;
 C_{uu} – коэффициент Шези;
 $n = 0,1 \sim 0,2$ – характеристика русла.

Из этой зависимости видно, что $u_r > 0$ в поверхностных слоях при $\frac{z}{H} \rightarrow 1$, и $u_r < 0$ в придонных слоях при $\frac{z}{H} \rightarrow 0$. То есть, в поперечном сечении потока в пределах изогнутого в плане русла имеет место поперечное циркуляционное течение, в котором поверхностные скорости направлены от центра кривизны или к вогнутому берегу, а донные скорости, наоборот, к центру кривизны или к выпуклому берегу.

Зависимость (1) позволяет количественно оценить параметры речного потока в пределах меандровых излучин и воздействие поперечного циркуляционного течения на русловые процессы, в частности: определить положение плоскости раздела разнонаправленных потоков в поперечном сечении.

На свободной поверхности, при $\frac{z}{H} = 1$ значение v_r равно

$$u_{R, \frac{z}{H}=1} = \frac{3u_j H C_{uu}}{f \cdot r \sqrt{g}} \quad (2)$$

У дна, т.е. при $\frac{z}{H} = 0$ радиальная скорость равна

$$u_{r, \text{дно}} = -\frac{u_j H C_{uu}}{nf \cdot r \sqrt{g}} \quad (3)$$

Поскольку $n \sim 1/7$, то, очевидно, что $v_{r \text{ дно}} > v_R$, т.е. наибольшая радиальная скорость вблизи дна почти в два раза превышает таковую на свободной поверхности потока.

Теперь, полагая, что по обе стороны от поверхности раздела эпюры осредненных скоростей, представляют собой квадратичные параболы (это, конечно, является приближением, упрощающим анализ), можно получить для средней скорости и расхода потока в верхнем слое, направленном от выпуклого берега к вогнутому

$$\bar{u}_R = \frac{2}{3} u_{R \max} \frac{z}{H}, \quad (4)$$

$$q_R = \bar{u}_R (H - h) = \frac{2}{3} u_{R \max} (H - h), \quad (5)$$

где: $v_{R \max}$ – определяется формулой (2).

Выполнив такую же процедуру для нижнего слоя, можно получить расход компенсационного течения в нижнем слое от вогнутого берега к выпуклому

$$q_r = \frac{2}{3} u_r h. \quad (6)$$

Приравнявая расходы q_R и q_r , получим

$$\frac{2}{3} u_{r \max} h = \frac{2}{3} u_{R \max} (H - h) \quad (7)$$

или $\frac{u_r}{u_R} = \frac{h}{H - h}$ перевернуть (8)

Из (8) с учетом (2) и (3) следует, что $\frac{h}{H - h} = \frac{7}{3}$, то есть толщина нижнего слоя на оси симметрии поперечного сечения русла $h = 0,3 H$.

Выполненный анализ показал, что на оси симметрии русла толщина придонного слоя, направленного от вогнутого берега к выпуклому, заметно меньше половины максимальной глубины, а средняя скорость движения в нем более, чем в 2 раза больше таковой в поверхностном слое. Насыщенный взвешенными наносами нижний слой переносит все, поступающие сверху донные наносы, к выпуклому берегу, обуславливая его наращивание в зоне отрыва потока, сразу за вершиной излучины.

Литература

1. Волынов М.А. Гидродинамический анализ поперечного циркуляционного течения в меандрах извилистого русла. Мелиорация и водное хозяйство, № 5, 2004 г.

УДК: 627:351.7:006

ОПЫТ ДЕКЛАРИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В ФЕДЕРАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

В.А. Голубкова, О.А. Доронкина, Г.В. Ляпин, М.А. Волынов, к.т.н.
ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

При наличии хорошо организованной службы эксплуатации и достаточном финансировании работа гидротехнических сооружений, образующих водохранилищные гидроузлы, не вызывает проблем в случае, если нагрузки на сооружения не превышают расчетные значения. Предусмотренные проектом функции гидротехнического сооружения могут быть условно разделены на две группы:

- профильные (обеспечение графика водоподачи при орошении, выполнение требований рыбного хозяйства, транспорта, рекреации, энергетики и др.), которые могут изменяться или исчезать при самопроизвольном или авторитарном перепрофилировании водохранилища;

- обязательные (пропуск высоких паводковых расходов, обеспечение санитарных попусков в нижний бьеф), которые должны выполняться в любых условиях при любом состоянии сооружений гидроузла.

За последние 20 лет в водохозяйственном комплексе АПК (включает большинство мелких водохранилищ, емкостью менее 10 млн. м³, и множество средних, емкостью менее 100 млн. м³) произошел ряд деструктивных изменений, среди которых можно выделить два основных: полное отсутствие финансирования эксплуатации и массовое исчезновение собственников гидроузлов. И то и другое привело к сокращению проектных функций водохранилищ до уровня простых объектов рекреации и местного рыболовства и к повсеместному упразднению службы эксплуатации гидроузлов.

Сокращение профильных (проектных) функций происходит относительно безболезненно, поскольку исчезли многие водопользователи, а вместе с ними и потребности в высоком функциональном уровне водохранилищ. Серьезные негативные последствия такой деградации проявятся в будущем, что приведет к чрезвычайной трудоемкости, а в ряде случаев - невозможности восстановления функционального уровня сооружений гидроузлов.

Отсутствие службы эксплуатации гораздо опаснее, так как при выполнении обязательных функций гидроузла лишен квалифицированного управления, пропуск паводковых и санитарных расходов происходит в некотором автоматическом режиме, который далеко не всегда может быть адекватным возникающим ситуациям. Фактически контроль функционирования гидроузлов (государственное имущество на многие миллионы рублей) отдан в руки местного населения, действия которого далеки от профессионализма, вероятны многомиллиардные ущербы от последствий чрезвычайных ситуаций.

Очевидным для местного населения мероприятием, уменьшающим угрозу аварии на неуправляемом гидроузле, является максимально возможное уменьшение емкости водохранилищ. Поэтому повсеместно наблюдается демонтаж затворов и наполнение водохранилищ только до уровня УМО или до отметок гребня автоматического водослива. Однако эта мера не позволяет «срезать» мгновенные максимальные паводковые расходы. В результате только уменьшаются размеры ущербов от возможных аварий, но угроза разрушения гидроузла сохраняется.

Сложившаяся ситуация привела к тому, что, начиная с 90-х годов прошлого века, участились случаи аварий на гидротехнических сооружениях. Например, за период 1996-1997 гг. на водохранилищах объемом менее 1 млн. м³ произошло 322 аварии, на более крупных водохранилищах – 78 аварий. Был нанесен огромный материальный ущерб, имелись многочисленные жертвы среди людей. Есть также основания полагать, что аварии на гидроузлах регистрируются и становятся известными только в тех случаях, когда имеются человеческие жертвы или нанесен существенный материальный ущерб. В действительности число аварий может быть значительно больше.

Рост аварийности гидротехнических сооружений явился одной из причин, которые побудили Правительство РФ принять законодательные меры для контроля безопасности ГТС. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» (№117-ФЗ от 21.07.97г.) установил обязанности органов государственной власти и собственников ГТС по обеспечению безопасности при

проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений посредством осуществления государственного надзора.

Этот закон обязывает собственника декларировать безопасность гидротехнических сооружений и определяет декларацию безопасности как основной документ, в котором обосновывается безопасность гидротехнического сооружения, содержатся сведения о соответствии этого сооружения утвержденным органом надзора критериям безопасности и определяются меры по предупреждению аварий ГТС. Составление декларации безопасности гидротехнического сооружения и проведение ее через экспертизу являются обязательными для всех организаций, в собственности или ведении которых находятся ГТС. Экспертиза деклараций безопасности проводится экспертными центрами, работающими во взаимодействии с Госнадзором МПР России и МЧС России.

Во исполнение Федерального закона было принято «Положение о декларировании безопасности гидротехнических сооружений» (Постановление Правительства РФ №1303 от 6 ноября 1998 г.), издан приказ МПР РФ «О реализации постановления Правительства Российской Федерации №1303 от 6 ноября 1998 г.» (№39 от 02.03.99 г.) и дополнительные требования к содержанию и форме декларации безопасности гидротехнических сооружений, поднадзорных МПР РФ.

Работа по декларированию безопасности ГТС охватывает, к сожалению, только крупные гидроузлы энергетического, транспортного и промышленного назначения. Что же касается гидросооружений АПК, в котором только в федеральной собственности Минсельхоза числится 242 крупных гидроузла, то здесь декларирование безопасности началось только в 2003 г. (около 20 деклараций).

В 1999-2000 гг. специалистами ВНИИГиМ были обследованы Усть-Джегутинское, Чограйское, Отказненское и Ленокумское водохранилища. В 2003 г. были составлены и проведены через государственную экспертизу декларации безопасности гидротехнических сооружений 10-ти водохранилищных гидроузлов в Саратовской, Белгородской, Липецкой, Владимирской, Вологодской областях и в Республике Марий Эл.

На основе изучения нормативных документов, архивных материалов и рабочих проектов упомянутых объектов, а также проведенного обследования гидротехнических сооружений гидроузлов можно сделать следующие обобщения:

- все нормативные документы, регламентирующие исполнение Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» созданы применительно к сооружениям, поднадзорным МПР России, т.е. для крупных энергетических и транспортных гидроузлов и защитных сооружений. Для гидросооружений, находящихся на балансе МСХ России (составляющих основу водобеспеченности АПК), эти документы применяются по умолчанию, т.е. не вполне обоснованно. Излишне напоминать, что конструктивные особенности и условия работы сооружений крупных гидроузлов и гидроузлов мелиоративного назначения существенно разнятся;

- на гидроузлах и в организациях-собственниках отсутствуют сведения о мерах по обеспечению безопасности, предусмотренных рабочими проектами, а также инструкции по предотвращению последствий чрезвычайных ситуаций;

- уровни воды в водохранилищах поддерживаются между отметками НПУ и УМО из-за плохого состояния водосбросов и донных водовыпусков (в первую очередь их затворов и подъемников), а также из-за большого заилиения чаш водохранилищ;

- все обследованные водохранилища используются только как объекты рекреации и местного рыболовства, частично - для хозяйственно-бытового водоснабжения;

- на всех объектах отсутствует охрана и постоянная служба эксплуатации, надзор за состоянием ГТС производится лишь группами местных энтузиастов в период весенних паводков;

- на всех объектах отмечены акты самовольного переоборудования сооружений гидроузлов, по сути «вандализма». Варварскими способами приводятся в негодность подъемные механизмы, затворные устройства, гидромеханическое оборудование водопроводящих сооружений. При этом преследуются две взаимоисключающие цели: противодействие якобы существующему намерению «властей» спустить водохранилище и предотвратить переполнение водохранилища в период весеннего половодья.

Предусмотренное законом декларирование безопасности применительно к ГТС на реках - водоисточниках АПК намечает состав мероприятий, выполнение которых позволяет поддерживать безопасное функционирование сооружений в их современном состоянии. Однако этого недостаточно для планирования работы сооружений в будущем. Для принятия решения о дальнейшей судьбе гидротехнического сооружения необходимо в каждом конкретном случае рассмотреть целый ряд проблем, нуждающихся в серьезном научном обосновании.

Выводы

1. Нормативно-методическая база Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» должна быть дополнена документами, разработанными применительно к обширной группе гидросооружений мелиоративного назначения, т.е. сооружений III и IV классов, а также сооружений, не подпадающих под классификацию СНиП о капитальности.

2. По Федеральному закону декларирование безопасности ГТС и все последующие действия может осуществлять только собственник, поэтому сооружения, в прошлом лишившиеся собственника, юридически не существуют до тех пор, пока не будет обретен новый собственник. Для того, чтобы предполагаемый собственник отдавал себе отчет, что и зачем он приобретает, «бесхозное» сооружение должно быть прежде всего обследовано и для него составлено научное и технико-экономическое обоснование мероприятий по его реконструкции, модернизации и дальнейшему использованию. Объем и стоимость такой работы значительно превышает стоимость декларирования, однако источники финансирования такой работы не определены.

3. При декларировании безопасности Закон предписывает собственнику указать пути достижения безопасности дальнейшего существования или функционирования сооружения. С технической точки зрения в их числе предполагаются: реконструкция, капитальный ремонт, ремонт, консервация и ликвидация.

4. Реконструкция, капитальный ремонт, ремонт ГТС кроме технико-экономических проработок нуждаются в серьезном научном и методическом обосновании. Для водного объекта, на котором находится рассматриваемое сооружение, должна быть разработана схема комплексного использования и охраны его водных ресурсов (СКИОВР) на перспективу; только в составе этой схемы могут быть назначены новые технические характеристики и функциональные нагрузки реконструируемого или ремонтируемого объекта.

5. Составление СКИОВР крупных и средних рек России было начато в 80-х годах прошлого века для условий социалистического способа ведения хозяйства и осталось незавершенным. В настоящее время разработка СКИОВР средних и малых рек, прежде всего представляющих интерес для АПК, должна проводиться на основании новых научно-методических рекомендации и инструкций, учитывающих коренное отличие существующей экономической реальности от условий, существовавших в бывшем СССР.

6. Решение о консервации или ликвидации водохранилищных гидроузлов и их сооружений также должны приниматься на основании глубоких научных проработок. Среди основных проблем, нуждающихся в научно-методическом обосновании, следует упомянуть: цель консервации или ликвидации водохранилища; способы рекультивации ложа водохранилища; восстановление для местного населения источников хозяйственно-бытового водоснабжения и объектов рекреации; восстановление гидроэкологической ситуации на водоисточнике, дважды нарушенной созданием, а затем ликвидацией водохранилищ.

Таким образом, требуемое Федеральным законом декларирование безопасности гидротехнических сооружений является только первым шагом, определяющим их современное состояние. Следующим шагом, очевидно, должны стать научно-исследовательские и научно-методические разработки, на основании которых могут быть составлены предложения и прогнозы о будущем состоянии гидротехнических сооружений.

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ ЛОТКОВ С ДЛИННОЙ ГОРЛОВИНОЙ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

А.М. Кушер, к.т.н.

ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

Гидрометрические лотки с длинной горловиной и схожие с ними водосливы с широким порогом являются распространенным средством водоучета в открытых руслах. Их принцип действия основан на преобразовании части по-

тенциальной энергии потока в верхнем бьефе в кинетическую энергию на участке сужения.

Основной гипотезой традиционного метода расчета гидрометрических лотков является предположение о наличии в горловине участка, на котором линии тока параллельны, а средняя скорость равна средней скорости в бесконечном канале с критическим уклоном. Поэтому теоретический расход Q принят равным

$$Q = \sqrt[2]{gw^3/ab}, \quad (1)$$

где w - площадь живого сечения, a - коэффициент Кориолиса, b - ширина по поверхности. Расчетную зависимость расхода Q от геометрического напора h в верхнем бьефе получают преобразованием уравнения (1) из условия равенства полной энергии потока в горловине и на входе сооружения. Для прямоугольного канала:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_V C_D b h^{3/2}, \quad (2)$$

где $C_V = (H/h)^{3/2}$ - коэффициент учета скорости подхода, $C_D = 1$ - коэффициент местных потерь, H - полный напор в верхнем бьефе. Для непрямоугольных каналов в выражение (2) вводят дополнительный коэффициент учета формы C_S . Вычисленный на основе теоретического соотношения расход зависит от H/L (L - длина горловины) и отличается от экспериментального по данным разных авторов на 10-20% [1]. Физическая причина этого различия не установлена. Результаты расчета корректируют с помощью коэффициентов на основе экспериментальных исследований.

Существует ряд методов расчета гидрометрических лотков. В простейшем случае фиксируют геометрию лотка, проводят экспериментальные исследования и подбирают аппроксимирующие функции, на основе которых вычисляют коэффициенты уравнения расхода. Из-за отсутствия теоретической базы этот метод не универсален и требует больших трудозатрат для проведения экспериментальных работ. Известны два теоретических метода расчета, основным положением которых является гипотеза, что причиной несоответствия теоретического и экспериментального расходов является трение на стенках сооружения. Предполагается наличие в горловине пристенного пограничного слоя, аналогичного течению на тонкой плоской пластине в бесконечном равномерном потоке. Методы различаются способом учета шероховатости стенок горловины. Допущениями первого метода являются:

- пограничный слой начинается от входа в горловину и является ламинарным;
- переход к турбулентному режиму течения происходит при $Re=3 \cdot 10^3$;
- критическое сечение расположено в конце горловины;
- кривизна линий тока в горловине равна нулю [2].

Расчет площади живого сечения и, далее, расхода выполняют с учетом толщины вытеснения в критическом сечении. Этот подход позволил унифицировать расчет прямоугольных, трапецеидальных и полукруглых гидрометрических лотков и утвержден стандартом Великобритании и Международным стандартом ISO [3,4].

Во втором методе при тех же допущениях определяют коэффициент шероховатости стенок по формулам расчета равномерных потоков [1]. Далее, по длине горловины и гидравлическому радиусу находят изменение полной энергии в критическом сечении, которое учитывается в ходе расчета осредненной энергии потока в верхнем бьефе. В отличие от первого метода, производится расчет коэффициента Кориолиса в критическом сечении, значение которого определяется по формулам для открытого равномерного потока. Эта модель расчета рекомендована для применения в США [5]. Обе модели расчета включают уточняющие коэффициенты и аналитические зависимости нефизического происхождения для лучшего соответствия экспериментальным данным. Для уменьшения погрешностей расчета, зависящих от соотношения H/L , в традиционных моделях искусственно занижена верхняя граница рабочего диапазона (до $H/L = 0,7$).

Целью настоящей работы являлось исследование работы гидрометрических лотков на основе анализа гидравлической структуры потока в сопоставлении с известными расчетными моделями. Объектом исследования выбраны лотки прямоугольной формы, расчет расхода в которых традиционными методами наиболее достоверен, так как основан на наибольшем числе экспериментальных данных. Поскольку классическая теория лотков критической глубины не разделяет лотки по типу сжатия потока (расчет ведется по площади критического сечения), исследованы потоки в лотках с донным и боковым сжатием. Для анализа гипотезы пограничного слоя проведено сопоставление потоков на водосливе с широким порогом и в горловине аналогичного лотка с донным сжатием.

Исследованы 10 прямоугольных лотков с равной длиной горловины (5- с донным сжатием, 5- с боковым сжатием) в прямоугольном канале. Учитывая, что в режиме свободного истечения форма выходной секции не влияет на структуру потока в горловине, угол сужения входной и расширения выходной секции выбраны равными, исходя из стандартного критерия для входной секции $ctg j = 3$ (j - угол между продольной осью и боковой стенкой участка сопряжения). Глубина потока в верхнем бьефе постоянна во всех расчетах. Диапазон значений коэффициента бокового сжатия $e = 0,23 - 0,77$ выбран исходя из геометрии канала и стандартных требований классического метода. Для сопоставления потоков при равной площади критического сечения для каждого лотка с боковым сжатием подобрана геометрия лотка с донным сжатием и равным расходом. Все расчеты проведены для режима свободного истечения. Сопоставление кинематической структуры течения в придонной области на водосливе и в лотке с донным сжатием выполнено при $p/L = 0,29$ (p - высота порога, L - длина горловины). Геометрия расчетного водослива и лотков приведена на рисунках 1- 3.

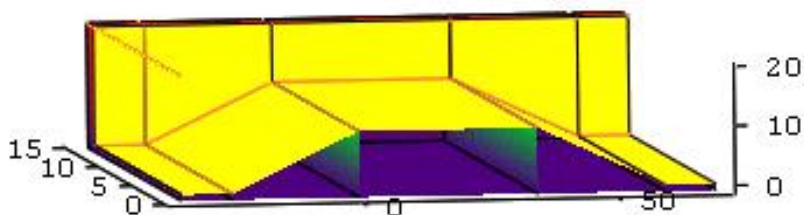


Рис. 1. Геометрия расчетного гидрометрического лотка с донным сжатием (осевое сечение)

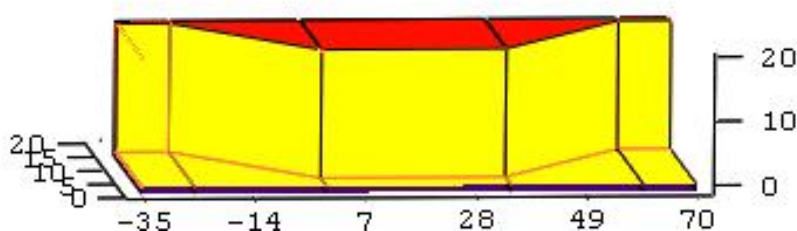


Рис. 2. Геометрия расчетного гидрометрического лотка с боковым сжатием (осевое сечение)

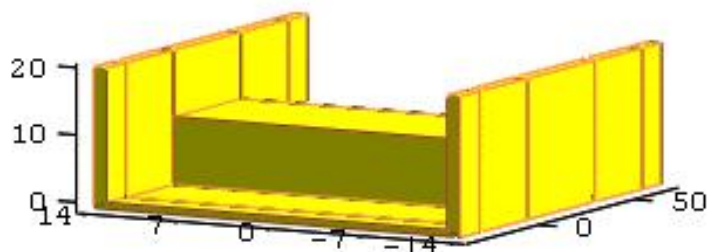


Рис. 3. Геометрия расчетного водослива с широким порогом

В качестве инструмента исследований использовался разработанный программный комплекс расчета гидрометрических сооружений на основе численного моделирования потока, включая средства расчета геометрии сооружения, генерации расчетной сетки, подготовки гидравлических граничных условий, численного решения полной системы уравнений движения и постобработки данных. Результатами расчета являются: свободная поверхность и 3-мерные поля скоростей и давлений. Программный комплекс был предварительно протестирован на задачах расчета резко неравномерного потока на свободном перепаде и параболического лотка критической глубины, для которых имелись экспериментальные данные. Различие расчетных и экспериментальных расхо-

дов, глубин и скоростей не превышало 3%, давлений- 5÷7%. Используемые в тестировании поля скоростей были найдены с применением разработанной телевизионной измерительной системы [6]. Точность измерения скоростей по данным стендовых испытаний и контрольной стробоскопической фотосъемки составляет 1-2%. Давления измерены Г-образным пьезометром с предельной погрешностью в области максимальной кривизны струй 5-10% (по данным расчета полной энергии сечений).

На рисунках 4-7 показаны профили свободной поверхности, продольных скоростей и давлений в осевом сечении горловины лотков с боковым и донным сжатием. На графиках давления штрих пунктиром показана линия гидростатического давления, красной штриховой линией- критическая глубина. Течение слева- направо. Как показал анализ, общая закономерность трансформации потока в горловине, существенно различаясь в деталях, одинакова для обоих типов лотка. Запас потенциальной энергии, образовавшийся за счет подпора потока, преобразуется в хорошо обтекаемой входной секции в кинетическую энергию. Уровень свободной поверхности уменьшается, образуя участок криволинейного течения. Продольный градиент давлений, увеличиваясь от поверхности к дну, вызывает ускорение потока в придонной области. Следствием этого является выравнивание исходного параболического профиля скоростей и отклонение профиля давлений от гидростатического закона на входном участке горловины. На выходе из горловины за счет изменения степени сжатия потока в выходной секции возникает градиент давлений, вызывая изменение профиля поверхности и скоростей на конечном участке. Механизм формирования структуры потока на выходе горловины зависит от типа лотка. В лотке с донным сжатием зафиксирована нижняя часть струи, а свободная поверхность зависит от структуры потока на входе зоны влияния выходной секции. При боковом сжатии (в режиме безотрывного течения) структуру потока определяет угол раскрытия выходной секции. Продольный градиент давлений, максимальный в придонной зоне, вызывает ускорение потока. Профиль давлений повторно отклоняется от гидростатического закона.

Структура течения в горловине определяется переходным процессом от входной до выходной секции. При малых значениях H/L размер зон влияния сопрягающих секций меньше длины горловины и после входа в призматическую горловину профили поверхности и скорости почти неизменны до зоны влияния выходной секции. В противном случае переходный процесс начинается сразу после входа потока в горловину. С уменьшением степени сжатия (увеличением расхода) возрастает скорость потока на входе в горловину и уменьшается кривизна поверхности на входном участке горловины. Вследствие уменьшения градиента давлений уменьшается деформация профиля скоростей, который на максимальных расходах сохраняет параболическую форму до конца горловины.

Контрольное ("критическое") сечение, параметры которого определяют расход в традиционных моделях, расположено в первой половине горловины- в зоне входного переформирования структуры потока. Линии тока в этом сечении не параллельны. Профиль продольных скоростей изменяется от пилообраз-

Высота порога (p/L) : **Sill = 0** Масштаб скорости: **Mu = 17.19**
 Боковое сжатие (B_t/B) : **e = 0.23** Масштаб давления: **Mp = 2.32**
 X- сечения (X/L): **X_sec^T = (0.02 0.2 0.41 0.59 0.8 0.98)**

Высота порога (p/L) : **Sill = 0** Масштаб скорости: **Mu = 16.12**
 Боковое сжатие (B_t/B) : **e = 0.69** Масштаб давления: **Mp = 2.38**
 X- сечения (X/L): **X_sec^T = (0.02 0.2 0.41 0.59 0.8 0.98)**

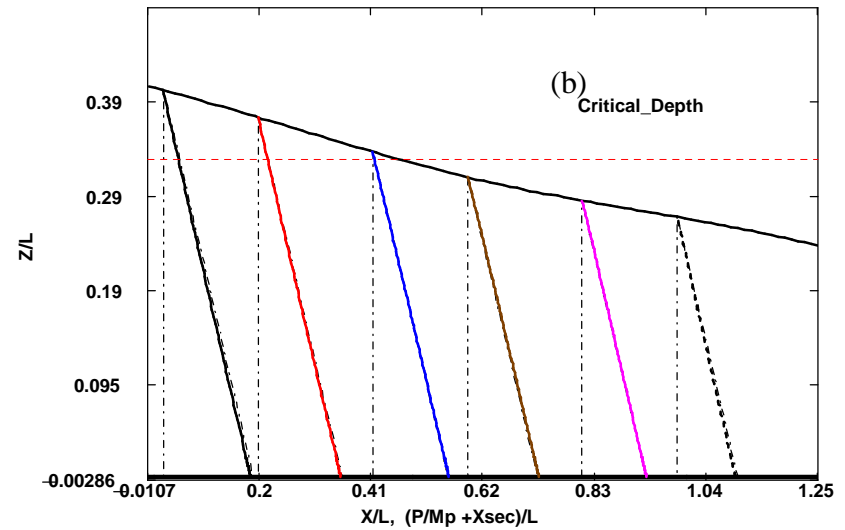
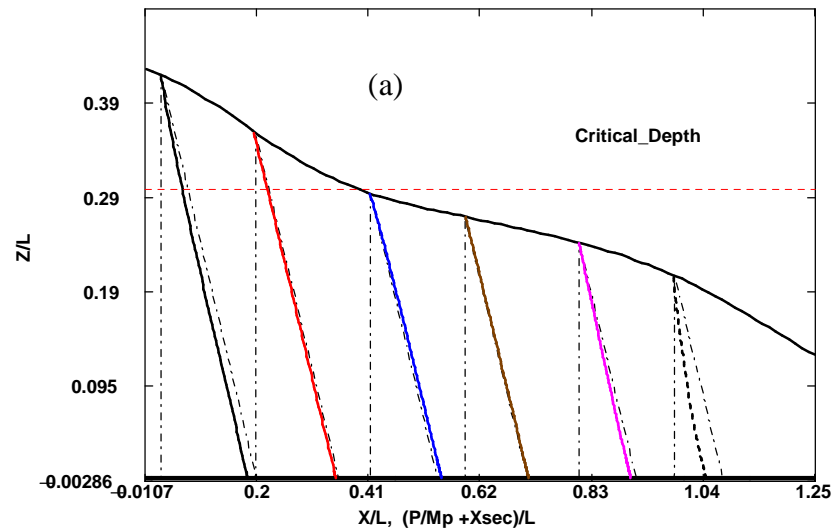
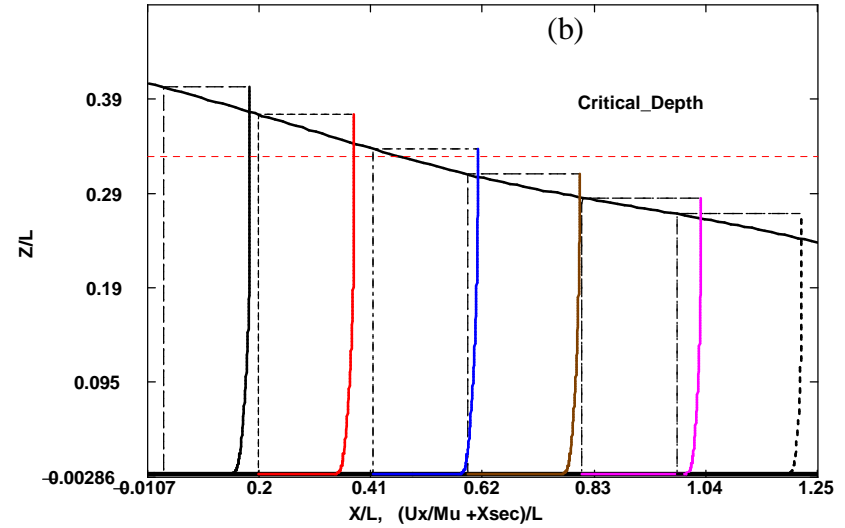
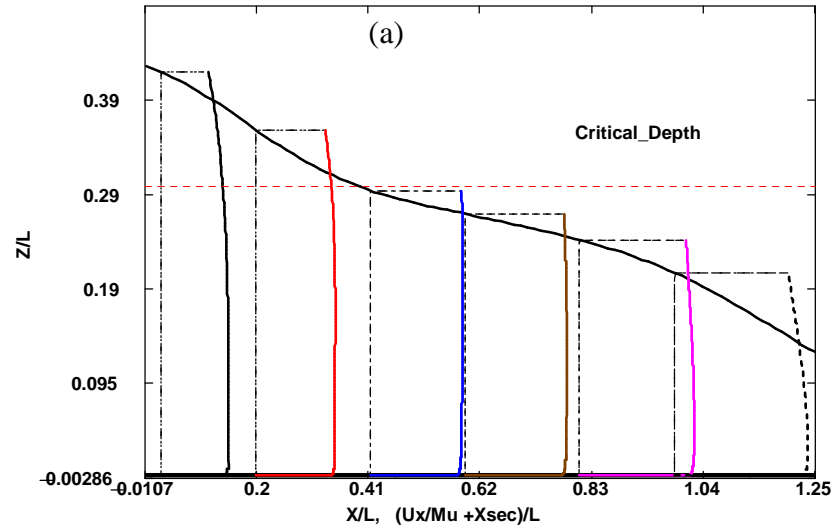
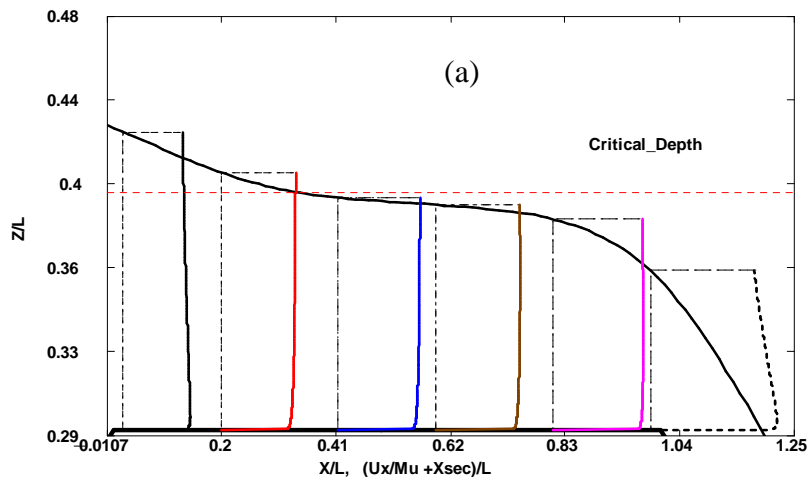


Рис. 4. Трансформация профиля продольных скоростей и удельных давлений
 в горловине лотка с боковым сжатием ($H/L=0,463$ (a) , $H/L=0,50$ (b))

Высота порога (p/L) : **Sill = 0.29** Масштаб скорости: **Mu = 12.5**
 Боковое сжатие (B_t / B) : **e = 1** Масштаб давления: **Mp = 0.82**
 X- сечения (X/L): **X_sec^T = (0.02 0.2 0.41 0.59 0.8 0.98)**



Высота порога (p/L) : **Sill = 0.11** Масштаб скорости: **Mu = 15.35**
 Боковое сжатие (B_t / B) : **e = 1** Масштаб давления: **Mp = 1.94**
 X- сечения (X/L): **X_sec^T = (0.02 0.2 0.41 0.59 0.8 0.98)**

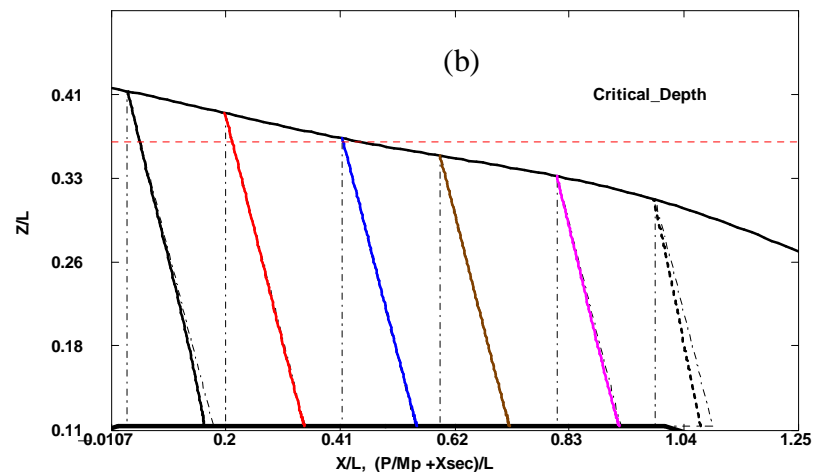
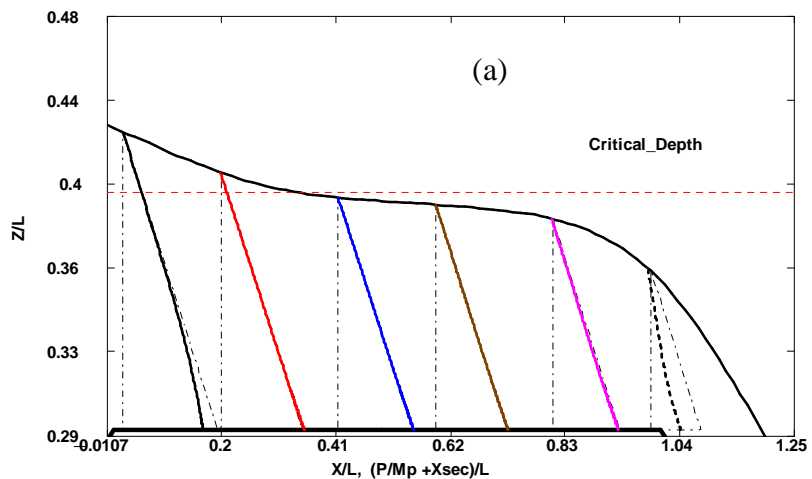
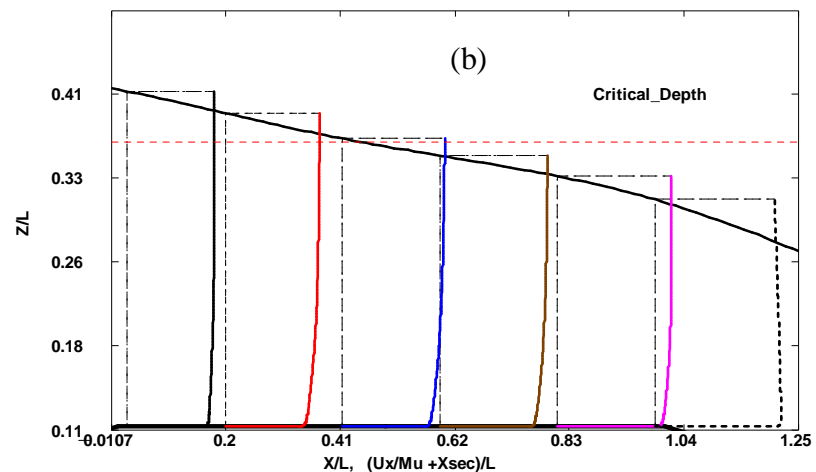


Рис. 5. Трансформация профиля продольных скоростей и удельных давлений
 в горловине лотка с донным сжатием ($H/L=0,173$ (a) , $H/L=0,394$ (b))

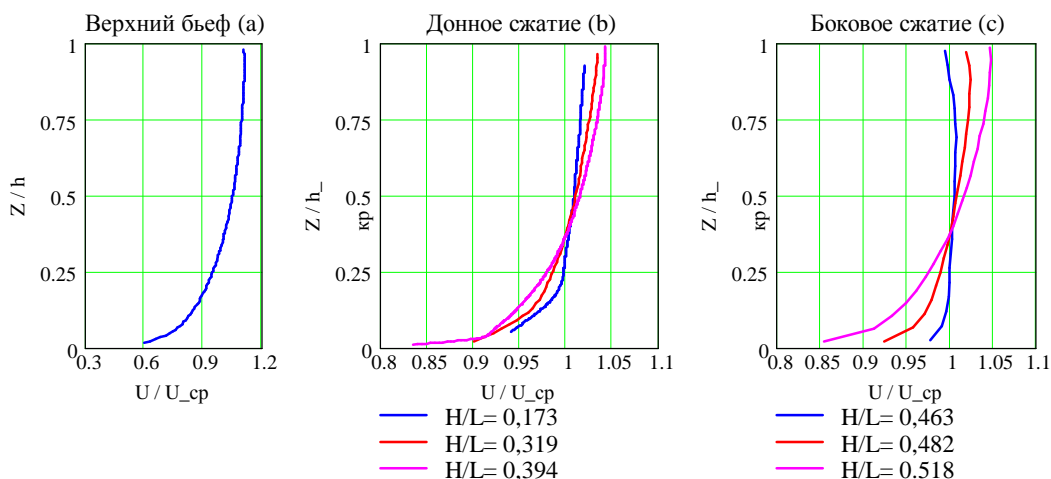


Рис. 6. Профиль продольных скоростей в верхнем бьефе (а) и в критическом сечении горловины лотка с донным (б) и боковым сжатием (с)

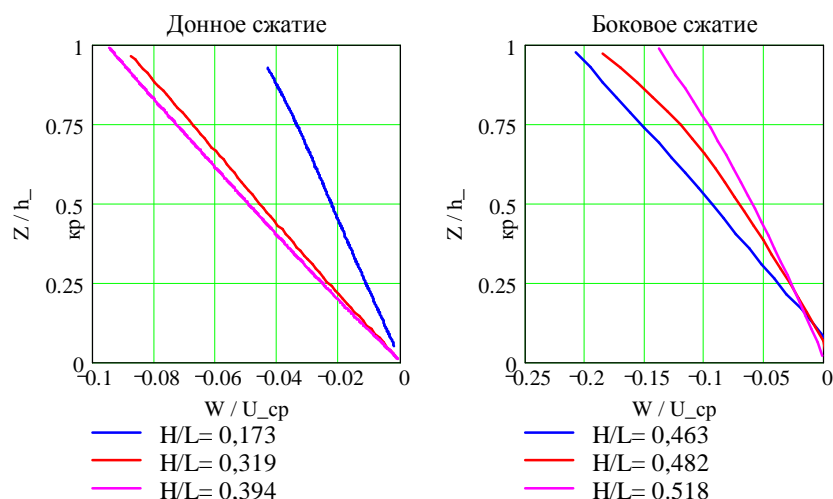


Рис. 7. Профиль вертикальных скоростей в критическом сечении горловины лотка

ного до параболического. Степень равномерности скоростей, оцененная коэффициентом Кориолиса, выше при малых значениях H/L . Форма профиля продольных скоростей при равных расходах зависит от типа сжатия (рис. 8). Значения вертикальных скоростей соизмеримы с величиной продольной скорости (рис. 9).

В детальном расчете потока в придонной области наличия пограничного слоя, связанного с отрывом потока на входе горловины лотка, не обнаружено. В отличие от водослива с широким порогом входная секция лотка обеспечивает плавное безотрывное течение в процессе трансформации структуры потока (рис. 8,9). Структура пограничного слоя на пороге водослива отличается от принятой в классической теории- толщина слоя уменьшается в зоне ускорения потока на выходном участке (рис. 10-11).

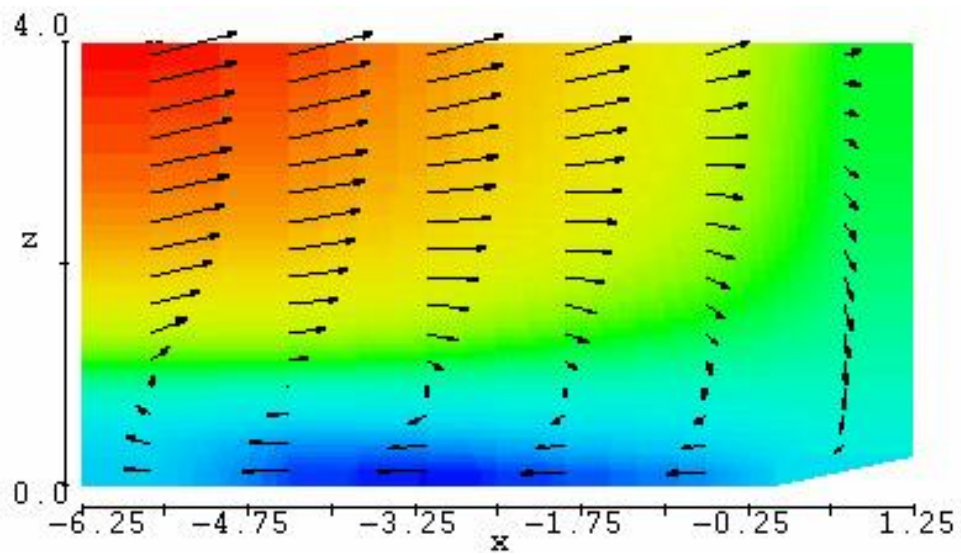


Рис.8. Кинематическая структура потока в придонной области перед водосливом с широким порогом

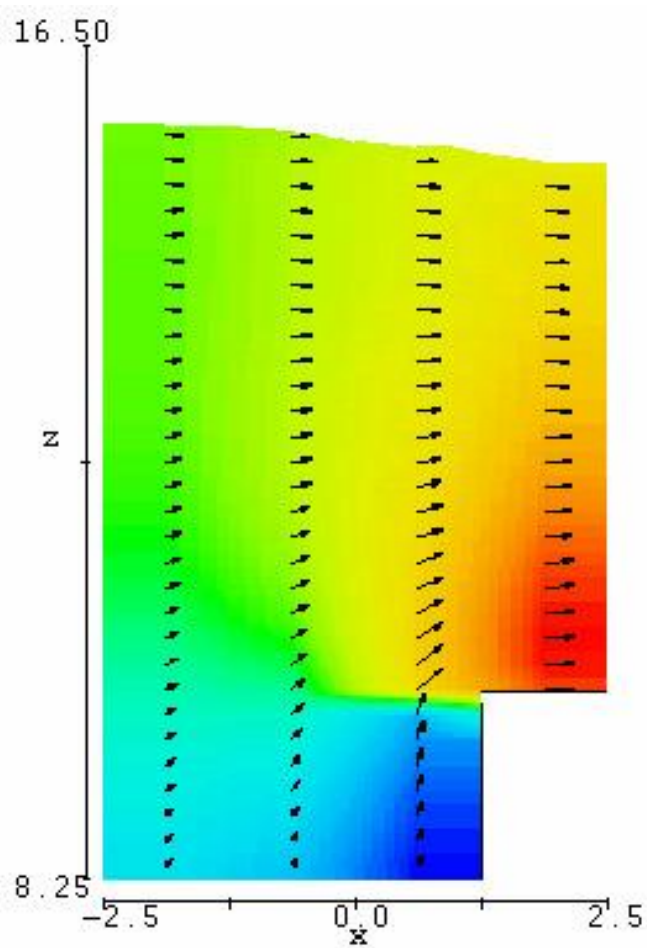


Рис.9. Течение на входной грани водослива с широким порогом

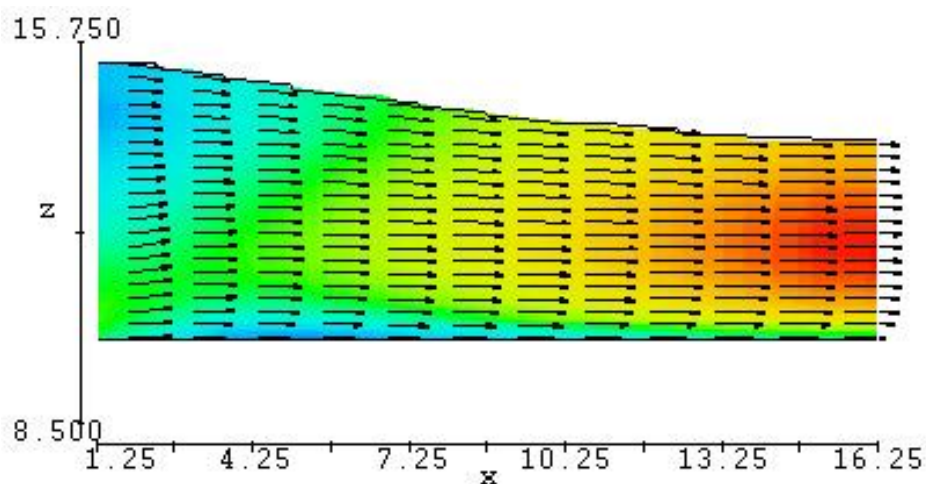


Рис. 10. Течение на входе водослива с широким порогом

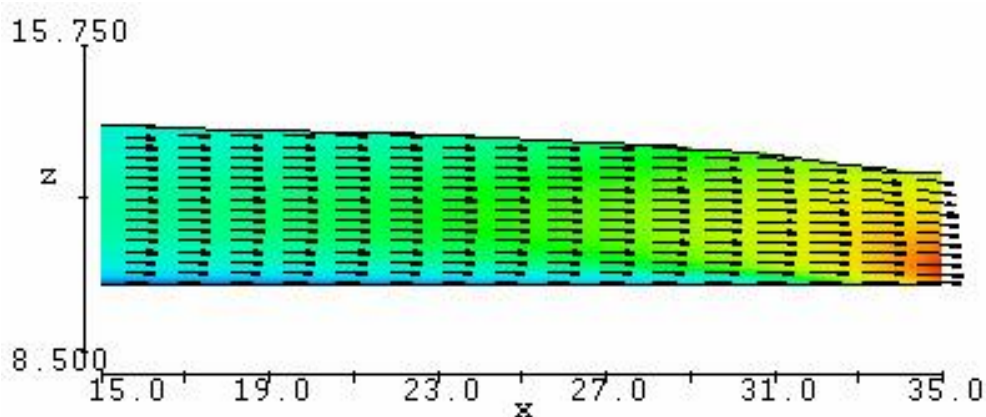


Рис. 11. Течение на выходе водослива с широким порогом

Результаты расчета расходов предлагаемым методом и по традиционной методике совпали с точностью 2-4%.

Выводы

1. Предлагаемый метод расчета, основанный на решении основных уравнений гидромеханики, обеспечивает точность расчета расхода 2-3% и имеет в сравнении с традиционными методами следующие преимущества:

- может применяться в любых пространственных и временных диапазонах, обеспечивая расчет сооружений произвольной геометрии и размеров, в том числе, не соблюдая стандартное требование горизонтальности сооружения;
- результаты расчета не связаны с точностью экспериментальных исследований, положенных в основу традиционных полуэмпирических методов, что особенно актуально для сооружений больших размеров;
- обеспечивает возможность существенного расширения допустимого диапазона расходов или уменьшения размеров сооружения за счет длины горловины, в то время, как лотки с длиной горловиной сохраняют гидрометрические свой-

ства до $H/L \cong 1,5$, традиционные методы ограничивают верхнюю границу диапазона значением $H/L=0,7$ в связи с невозможностью учета структуры криволинейного потока [1].

2. Результаты исследования не подтверждают основную гипотезу традиционных методов о существовании в горловине критического потока.

3. Положенное в основу расчета предположение, что основной причиной различия расчетных и экспериментальных расходов являются местные потери, связанные с шероховатостью стенок, физически неправомерно. Течение в гидрометрическом лотке определяется структурной трансформацией потока в зависимости от формы сооружения, длины горловины, напора и скорости подхода.

4. Форма профилей скоростей в горловине показывает неприменимость теории пограничного слоя на пластине для расчета толщины вытеснения и, далее, расхода.

5. Структура потока в контрольном ("критическом") сечении не отвечает критериям критического потока, а для описания профиля скоростей не применимы выражения для равномерного потока в открытом русле.

6. Из-за большого числа влияющих факторов модернизация существующей теории расчета, например путем учета вертикальных скоростей и введением дополнительных выражений для коэффициента Кориолиса в уравнении (1), представляется бесперспективной.

Литература

1. Bos M.G., Replogle S.A., Clemmens A.J. Flow Measuring Flumes in Open Channel Systems. Chichester- New York- Brisbane- Toronto- Singapore, John Wiley and Sons, 1984.
2. Ackers P., White W.R., Perkins T.A., Harrison A.J. Weirs and Flumes for Flow Measurement. Chichester- New York- Brisbane- Toronto, John Wiley and Sons, 1978.
3. British Standards Institutions, Part 4: Weirs and Flumes, Part 4C: Flumes, in Methods of Measurement of Liquid Flows in Open Channels, BS3680, BSI, London, 1973.
4. ISO 1438/1 "Water Flow Measurement in Open Channels Using Weirs and Flumes. Part 1: Thin-plate Weirs". Geneva, ISO, 1980.
5. Water Measurement Manual. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Third Edition, 1997.
6. Кушер А.М. Разработка и применение новых методов исследования кинематической структуры водного потока. Канд. дисс., М., 1999.

УДК 627.83

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО СТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ГМС

С.С.Медведев, к.т.н., Н.В.Лебедев, к.т.н., А.С. Каргапольцев
ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

Гидротехнический комплекс оросительных мелиоративных систем (ГМС) представляет собой сложный инженерный объект, включающий водоисточник (река, водохранилище и др.), водозаборный узел (плотинный, бесплотинный), водоподпорные и ограждающие сооружения (плотины, дамбы и др.), наносоре-

гулирующие и водопропускные сооружения (отстойники, наносоперехватывающие галереи и др.), водопроводящие тракты различной номенклатуры (открытые и закрытые) и другие сооружения, обеспечивающие проектный режим работы ГМС. Надежность работы каждого из элементов гидротехнического комплекса определяет надежность функционирования ГМС в целом.

Одной из причин снижения надежности и экологической безопасности ГМС является неудовлетворительное регулирование твердого стока по элементам гидротехнического комплекса.

Регулирование твердого стока при водозаборе из открытых источников. Наиболее сложные вопросы регулирования твердого стока возникают при водозаборе из рек, несущих большое количество наносов. Существовавшая до последнего времени концепция, характерная не только для ирригационного, но и для энергетического, промышленного и коммунального водозабора, предполагает: обеспечение гарантированного по объему и времени водозабора; ограничение вовлечения в водозабор твердого стока.

Решение первой из перечисленных задач осуществляется, как правило, путем создания регулировочной емкости (водохранилища) и/или отбора из водоисточника до 80% жидкого стока. Вторая - решается путем включения в состав водозаборного узла различных наносоперехватывающих устройств (песколовки, НПП*, отстойники и т.п.). Оба этих решения приводят к нарушению сбалансированной работы водоисточника, водозабора и сети, затоплению и подтоплению определенной территории, нарушению естественного гидрогеологического и гидрологического режима, перегрузке потока наносами и др.

В маловодные годы реализация указанной концепции водозабора неизбежно приводит к ущемлению интересов ряда водопользователей и водопотребителей (как правило, расположенных ниже по течению водоисточника), что вызывает, кроме того, и социальную напряженность. Очевидно, настало время замены этой концепции на другую, позволяющую учитывать современные экологические, экономические и социальные требования. Новая концепция должна включать следующие основные положения:

- ограничение водозабора по стоку (до объемов, способных транспортировать оставшийся твердый сток);

- обеспечение гарантированного по объему и времени водозабора с учетом транспортирующей способности водотока ниже водозабора, экологических особенностей водоисточника, а также приоритетов водопользователей;

- отказ от русловых емкостей большого объема и их замена (при необходимости) внерусловыми;

- обеспечение пропорционального забора жидкого и твердого стока с последующей аккумуляцией и утилизацией последнего вне существующего русла;

- рассредоточение и транспорт наносов по элементам сети с отделением из взвесенесущего потока почвообразующих фракций наносов и их подачей на поля.

* НПП – наносоперехватывающие галереи

Для решения задачи регулирования твердого стока необходимо определить взаимодействие между твердым и жидким стоком реки-источника орошения. Количество наносов, внутригодовое распределение взвешенных и донных наносов, а также их крупность определяются водным режимом рек, гидравликой потока, условиями склоновой и русловой эрозии, присущей данному бассейну реки. Зависимости расхода наносов (R) и их фракционного состава от расхода воды (Q) могут быть иллюстрированы: временными среднесуточными или среднедекадными расходами воды и наносов с подразделением последних на фракции; графиками связи $R=f(Q)$.

Основные принципы рационального распределения твердого стока по элементам оросительной сети сводятся к следующему. Для обеспечения динамически устойчивого режима работы всех водопроводящих трактов ГМС необходимо, чтобы на каждом участке количество переносимой потоком взвеси соответствовало транспортирующей способности на этом же участке.

Для сохранения динамической устойчивости русла в период эксплуатации оросительной системы значение мутности потока в каждом из элементов оросительной сети должно находиться в пределах:

$$r_{кр} < r_k < r_T, \quad r_{кри} < r_{ки} < r_{Ti}, \quad (1)$$

где r_k и $r_{кр}$ - расчетная и критическая мутность потока в канале, кг/м^3 ; $r_{ки}$ и $r_{кри}$ - то же для отдельной i -той фракции наносов, кг/м^3 ; r_T и r_{Ti} - суммарное значение транспортирующей способности потока и отдельной фракции i , кг/м^3 .

Твердый сток по элементам оросительной сети должен распределяться строго в соответствии с графиком водопотребления, т.е. в увязке с распределением жидкого стока. Сток наносов и их фракционный состав при этом регулируется посредством наносорегулирующих устройств, установленных в местах деления жидкого стока.

Твердый сток реки-источника орошения распределяется по элементам сети оросительной системы следующим образом. Воду из магистрального канала в каналы распределительной сети отбирают из слоя потока, транспортирующего наибольшее количество наносов с крупностью частиц, полезных для орошаемых почв. Перед водозабором (T_1) из реки (1) в магистральный канал (2) устанавливается наносорегулирующее устройство (струенаправляющая система, донные пороги и т.д.) (3) с помощью которого регулируется поступление твердого стока в магистральный канал по объему и фракционному составу. Концентрация и фракционный состав наносов определяется, исходя из условия обеспечения критической мутности потока на участке $T_1 - T_2$, а также в реке ниже водозабора (рис.1).

В зависимости от значений критической мутности потока на участке $T_2 - T_3$ магистрального канала и в распределительном канале (4) в точке T_2 осуществляется деление расходов воды и стока наносов. При этом в точке T_2 магистрального канала распределение твердого стока регулируется при помощи наносорегулирующего сооружения (3), установленного перед водозабором в распределительный канал (4) и регулятором стока (5). Аналогично происходит деление

твёрдого стока по другим элементам сети оросительной системы, исходя из потребности в мелких фракциях наносов для орошаемых полей.

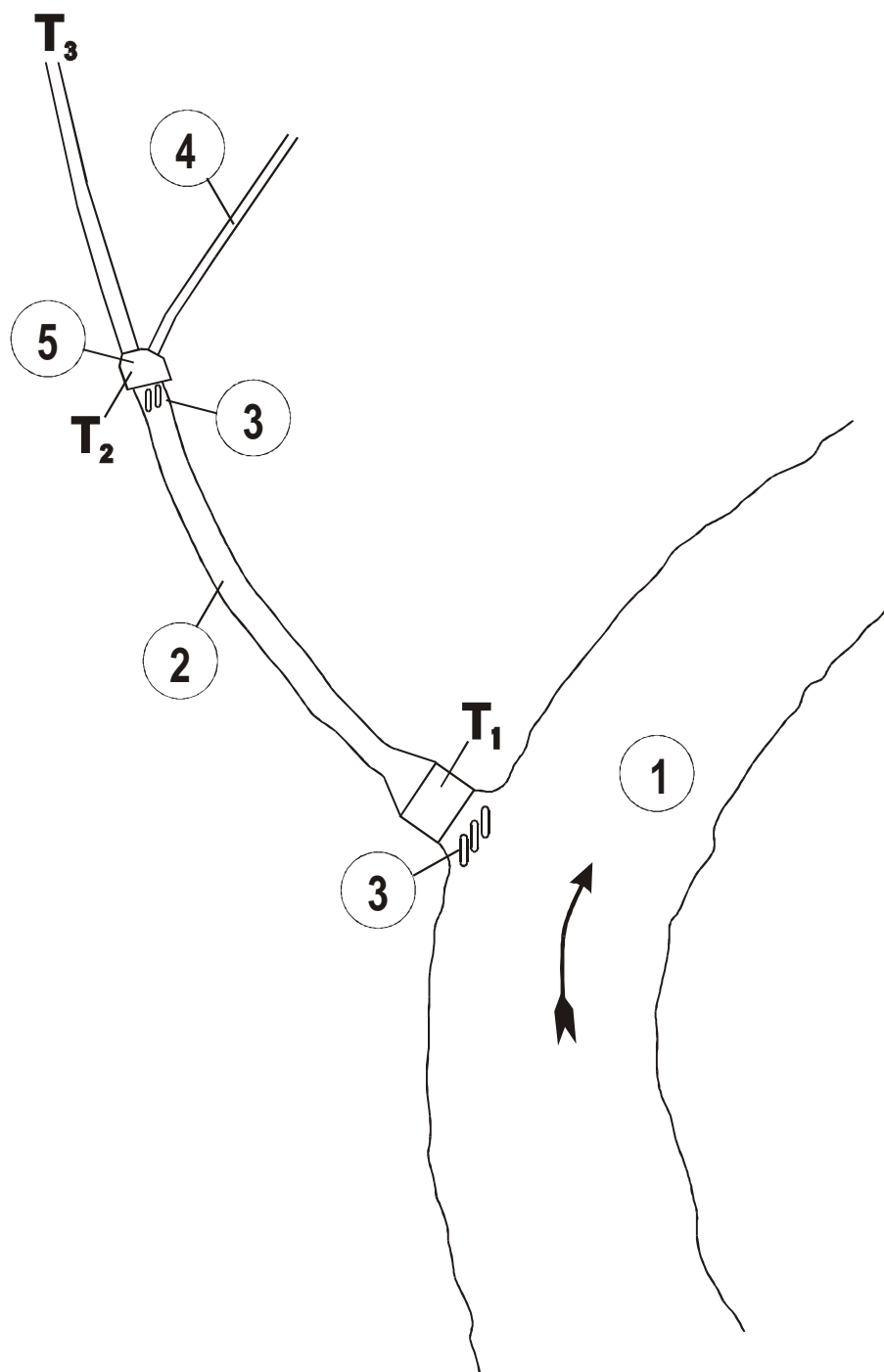


Рис. 1. Схема бесплотинного водозаборного гидроузла

При высокой мутности и незначительной дифференциации наносов в водоисточнике возможно использование другой схемы, обеспечивающей транспорт наносов в системе. Основные решения показаны на рисунке 2. Вода, отбираемая из источника орошения (1), имеет высокую мутность τ_0 , которую не-

возможно разделить путем отбора из верхних горизонтов. Для обеспечения транспортирующей способности оросительных каналов (2), (3), (4) устраивают головной подводный канал-отстойник (1') с различными способами утилизации осаждаемых наносов. Основным условием является создание в подводном канале гидравлического режима, обеспечивающего осаждение крупных фракций и доведение мутности до критической, для чего увеличивают ширину подводного канала и уменьшают скорости потока до $V_{отст.} < V_{три.}$

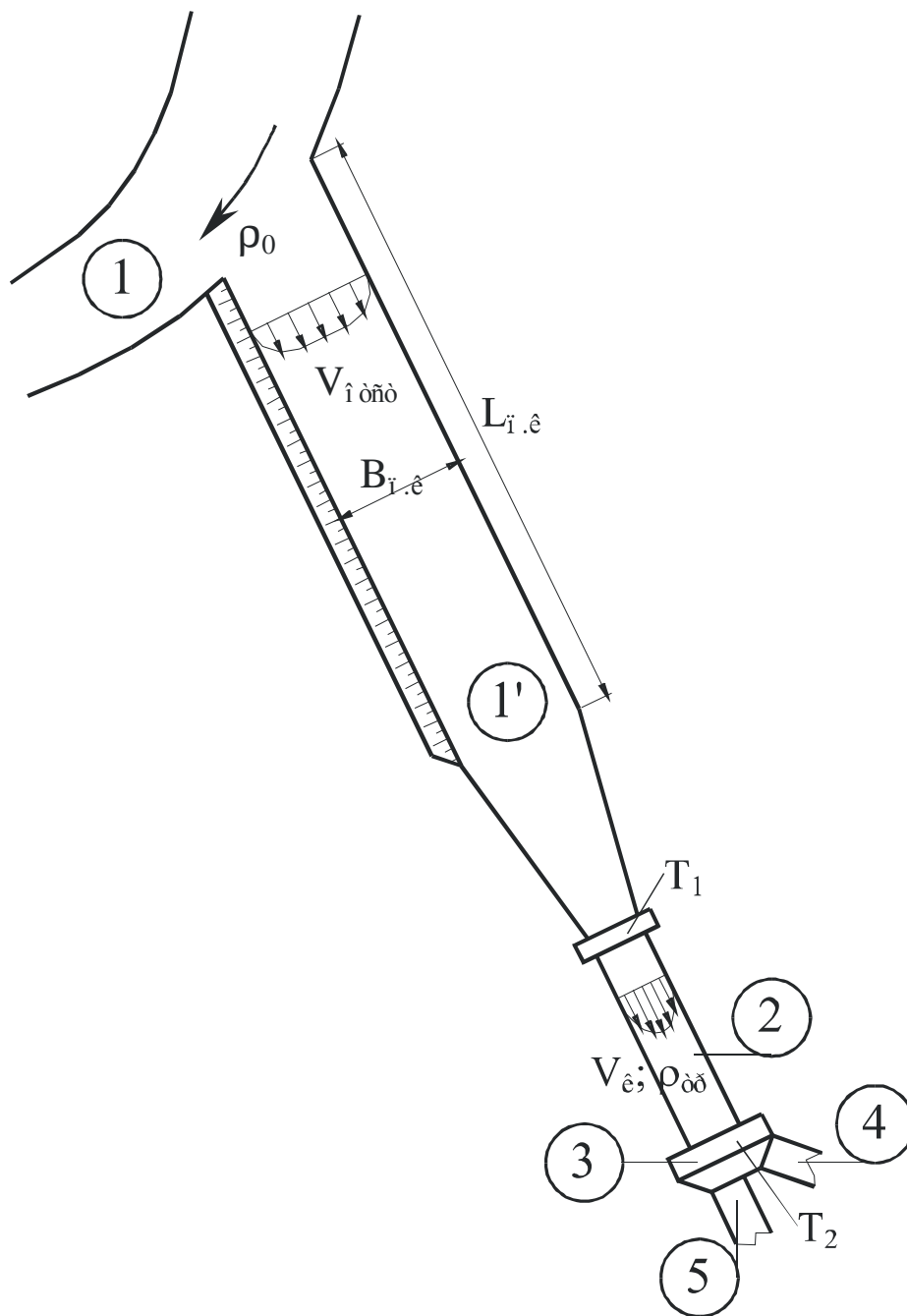


Рис.2. Схема водозабора с головным подводным каналом-отстойником

Режим работы подводного канала обеспечивается маневрированием затворами головного сооружения T_1 . Длина подводного канала назначается, исходя из условия обеспечения полного осаждения требуемых фракций с учетом

режима работы оросительной системы, реки и очистных устройств. Утилизация наносов производится в береговых кавальерах или путем заиления стариц и понижений.

В случае возникновения ситуации, когда отсутствует возможность транспортирования наносов внутри оросительной системы, при делении расхода (3) на узле T_2 , необходимо устраивать внутрисистемный отстойник для обеспечения более технологичной и дешёвой очистки канала (5) от определенных фракций наносов, превышающих его транспортирующую способность (рис.3).

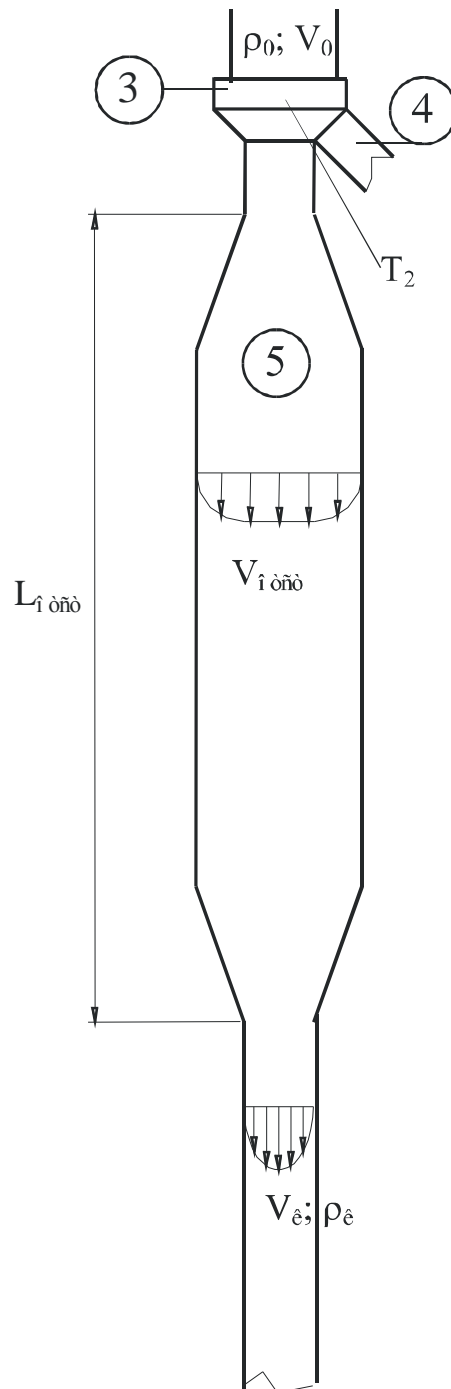


Рис.3. Схема внутрисистемного канала отстойника

Для расчета динамически устойчивых русел гидротехнических элементов оросительной системы разработана методика, в основу которой положен принцип соблюдения баланса твердого стока на расчетном участке русла канала при отсутствии русловых деформаций. За расчетный участок принимается участок русла канала между створами деления (или слияния) взвесенесущего потока, ниже которых характеристики твердого стока изменяются. Такими точками деления (или слияния) взвесенесущего потока являются: места отбора воды из магистрального канала в элементы распределительной сети, места отбора воды из распределительного канала на орошаемые поля, точки сбросов воды в каналы, зоны аккумуляции наносов в отстойниках и места сбросов их осветленной воды.

Принимая транспортирующую способность потока в отношении донных наносов равной нулю, Х.Ш. Шапиро получил формулу для определения минимальной гидравлической крупности донных отложений ($W_{\min \partial}$) при отсутствии деформаций русла, при которой оно будет динамически устойчивым:

$$W_{\min \partial} = 0,5u_{\partial}^* , \quad (2)$$

где u_{∂}^* - максимальная гидравлическая крупность донных наносов, м/с:

$$u_{\partial}^* = 1,1U_* = 1,1\sqrt{gHI} , \quad (3)$$

где g - ускорение свободного падения, м/с²; H - средняя глубина потока, м; I - уклон водной поверхности; U_* - динамическая скорость потока:

$$U_* = \sqrt{gHI}$$

Из формул (2) и (3) получим:

$$W_{\min \partial} = 0,55U_* \quad (4)$$

При равномерном движении воды в канале и при $g = 9,81$ м/с² уклон дна его динамически устойчивого русла равен:

$$I^* = W_{\min \partial}^2 / 0,302gH \quad (5)$$

$W_{\min \partial}$ в формуле (5) определяется по результатам анализа состава донных отложений на расчетном участке русла.

Зная уклон динамически устойчивого русла канала, по формулам Х.Ш.Шапиро вычисляется его ширина и средняя глубина, м:

$$B = f\sqrt{Q/I^*} , \quad H_{cp} = (n\sqrt{Q}/f)^{3/5} , \quad (6)$$

где Q - расход воды, м³/с; n - коэффициент шероховатости; f - эмпирический коэффициент, равный для каналов 0,05...0,1, для равнинных участков рек 0,07...0,16.

Приняв фактический уклон водной поверхности на расчетном участке канала равным динамически устойчивому (из формулы 5), при известной минимальной гидравлической крупности донных отложений вычисляется глубина потока в динамически устойчивом русле, м:

$$H_{cp} = W_{\min \partial} / 0,302gI^* \quad (7)$$

Для расчета рационального деления взвесенесущего потока по элементам оросительной системы, обеспечивающего ее эксплуатационную надежность, разработана методика, в основу которой положен принцип обеспечения ус-

тойчивого транспорта наносов по элементам оросительной сети ниже точек изменения в них гидравлического режима потока.

Исходная информация, необходимая для расчета, включает: график распределения расходов воды по элементам оросительной сети; характеристики гидротехнических водопроводящих элементов оросительной сети (уклон дна, размеры поперечного сечения, фракционный состав взвешенных донных наносов и донных отложений); гидрологические характеристики реки-источника орошения в районе водозабора в магистральный канал (гидрограф, график колебаний уровней воды, расходы и гранулометрический состав взвешенных и донных наносов, уклоны водной поверхности); наличие в комплексе оросительной системы сооружений, регулирующих твердый сток (различные типы отстойников и делителей твердого стока), их месторасположение и характеристики.

Расходы взвешенных и донных наносов в отношении различных фракций в элементах оросительной сети определяются следующим образом. В определенный период из реки в магистральный канал поступает расход воды Q_0 с мутностью потока

$$r_o = \sum_{i=1}^{i=n} r_{oi}$$

Критическая мутность потока (кг/м^3) в элементах сети определяется по формуле:

$$r_{kp} = \sum r_{kpi}; \quad r_{kpi} = m_i / m_{Tpi} \cdot r_{Ti}; \quad r_{Ti} = r_{T\delta i} + r_{T\delta i}, \quad (8)$$

где r_{kpi} - критическая мутность для отдельной фракции наносов; m_i и m_{Tpi} - удельное содержание фракций в составе донных отложений и транспортируемых потоком наносов при полном насыщении ими потока; $r_{T\delta i}$ и $r_{T\delta i}$ - транспортирующая способность потока в отношении отдельной фракции взвешенных наносов (определяется по формуле (9) Х.Ш.Шапиро и донных наносов, r_{δ} и $r_{\delta i}$ - по формулам (10), (11) С.С.Медведева:

$$r_T = \sum_{i=1}^{i=n} r_{T\delta i}; \quad r_{T\delta i} = k_i V^{0,7} u_g^* \left(\frac{W_{i+1}}{W_i} - \frac{W_{i+1} - W_i}{u_g^*} \right); \quad (9)$$

$$r_{\delta} = \sum_{i=1}^{i=n} r_{\delta i}; \quad r_{\delta} = V^{0,9} (6,04 u_g^* - 12,4 W_i) \quad \text{для } d > 0,1 \text{ мм} \quad (10)$$

для остальных более мелких фракций:

$$r_{\delta i} = 12,4 V^{0,9} (W_{i+1} - W_i) \quad (11)$$

Транспортирующая способность потока вычисляется по формуле:

*для отдельных фракций наносов

$$r_{Ti} = r_{T\delta i} + r_{T\delta i}, \quad (12)$$

*суммарная величина мутности

$$r_T = \sum_{i=1}^{i=4} r_{Ti}, \quad (13)$$

где k_i - эмпирический коэффициент ($k_i = 12$ для фракции с $d > 0,1$ мм; $k_i = 59$ для фракции $0,1 \text{ мм} > d > 0,05$ мм; $k_i = 85$ для фракции $0,05 \text{ мм} > d > 0,01$ мм и

$k_i=94$ для фракции $d < 0,01$ мм); V - средняя скорость потока, м/с; u_6^* и u_d^* - максимальная гидравлическая крупность взвешенных и донных наносов, м/с; W_{i+1} W_i - максимальная и минимальная гидравлическая крупность наносов в пределах фракции i (i - порядковый номер фракции наносов).

Для обеспечения надежной эксплуатации оросительной системы твердый сток, поступающий в водозабор, распределяется по ее элементам согласно зависимости:

$$Q_o r_{кpio} = r_{кpioмв} Q_{омв} + r_{кpi1} Q_1 \quad (14)$$

где Q_o и Q_1 - расходы воды в канале до и после разделения потока, м³/с; $Q_{омв}$ - расход воды, направляемый в отвод, м³/с; $r_{кpio}$ и $r_{кpi1}$ - критическая мутность потока в канале в отношении отдельной фракции наносов до и после разделения взвесенесущего потока, кг/м; $r_{кpioмв}$ - критическая мутность потока в отводе, кг/м.

Вода из канала в распределители отбирается из определенного слоя потока, транспортирующего основную массу наносов с фракционным составом, обеспечивающим соблюдение равенства (14).

Как правило, водный поток в реке и каналах недостаточно насыщен мелкими фракциями наносов ($d < 0,05$ мм), т.е. $r_{phi} < r_{кpi}$, где r_{phi} и $r_{кpi}$ - фактическая и критическая мутность потока в отношении мелких фракций наносов с $d < 0,05$ мм, кг/м³. Можно перераспределить твердый сток в отношении мелких фракций наносов по элементам оросительной сети с учетом потребности орошаемых почв в таких наносах.

Тогда формула (14) будет иметь вид:

$$Q_o r_{oi} = Q_{омв} r_{омви} + Q_1 r_{i1}, \quad (15)$$

где r_{oi} и $r_{омви}$ - мутность потока в канале до отвода и принятая непосредственно в отводе, кг/м³, при этом $r_{oi} < r_{кpio}$; $r_{омви} < r_{кpioмв}$; r_{i1} - мутность потока в канале после отвода, кг/м³.

Из формулы (15) находим:

$$r_{i1} = \frac{Q_o r_{oi} - Q_{омв} r_{омв}}{Q_1} \quad (16)$$

Распределение твердого стока при следующем отводе осуществляется, исходя из полученного по формуле (16) значения r_{i1} .

Расходы наносов в элементах оросительной сети вычисляются по формуле:

$$G_o = G_{омв} + G_i; \quad G = Q r_{кр} T, \quad (17)$$

где G_o и G_i - сток наносов в канале до и после разделения взвесенесущего потока за расчетный период T , кг; $G_{омв}$ - сток наносов, поступающих в отвод из канала за расчетный период времени T , кг.

В заключение отметим, что регулирование твердого стока должно начинаться при водозаборе и заканчиваться водовыпуском на орошаемое поле.

Литература

1. Шапиро Х.Ш. Регулирование твердого стока при водозаборе в оросительные системы. - М.: Колос, 1983.
2. Руководство по гидравлическим и русловым расчетам речных гидроузлов. – М.: В/О "Союзводпроект", 1980.
3. Медведев С.С., Вербицкий В.С. Рациональное распределение твердого стока по элементам оросительной системы // Сб. "Современные проблемы мелиораций и пути их решения". - М.: 1999.
4. Шамов Г.И. Речные наносы. Гидрометеиздат, Л.

УДК 626.8

ПРОБЛЕМА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ГИДРОУЗЛОВ ИРРИГАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

Т.В. Наумова, к.т.н.

ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

Эксплуатационные организации и собственники гидротехнических сооружений, выполняющие работу по декларированию их безопасности во исполнение Закона РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» (№ 117-ФЗ от 21.07.97 г.), столкнулись с рядом научно-технических проблем, одной из которых является отсутствие четкой методики определения возможных состояний гидротехнических сооружений в процессе их эксплуатации. Особенно это касается гидротехнических сооружений, входящих в систему АПК, т.к. изменение форм собственности привело к потере сложившейся эффективной системы их эксплуатации, в результате чего возникли проблемы с поддержанием ГТС в исправном техническом состоянии и обеспечении их безопасности.

Большинство крупных ирригационных систем сосредоточено в Южных областях РФ на реках, несущих большое количество наносов, вследствие чего водохранилища головных водозаборных сооружений оказались практически полностью заилены и при пропуске через гидроузлы даже обычных паводков 50-75% обеспеченности возникает угроза превышения расчетных отметок в верхних бьефах, что может привести к возникновению аварийных ситуаций. На рисунке 1 представлен график, характеризующий интенсивность заиления верхнего бьефа Терско-Кумского гидроузла, который наглядно демонстрирует полное его заиление до бытовых отметок в течение первых десяти лет эксплуатации гидроузла. Интенсивность заиления верхних бьефов гидроузлов (Чегемский, Баксанский), расположенных на горных и предгорных участках рек, оказалась еще выше (в среднем 5 лет).

В последние годы на реках Северного Кавказа и Краснодарского края наблюдается прохождение высоких паводков редкой повторяемости, что связывается рядом авторов с «глобальным потеплением климата», вызывающим интенсивное таяние ледников в сочетании с выпадением ливневых осадков. На рисунках 2 и 3 представлены гидрографы в створах Терско-Кумского и Краснодарского гидроузлов, на которых видны резкие скачки величин паводковых расходов, наблюдаемые за последние три года.

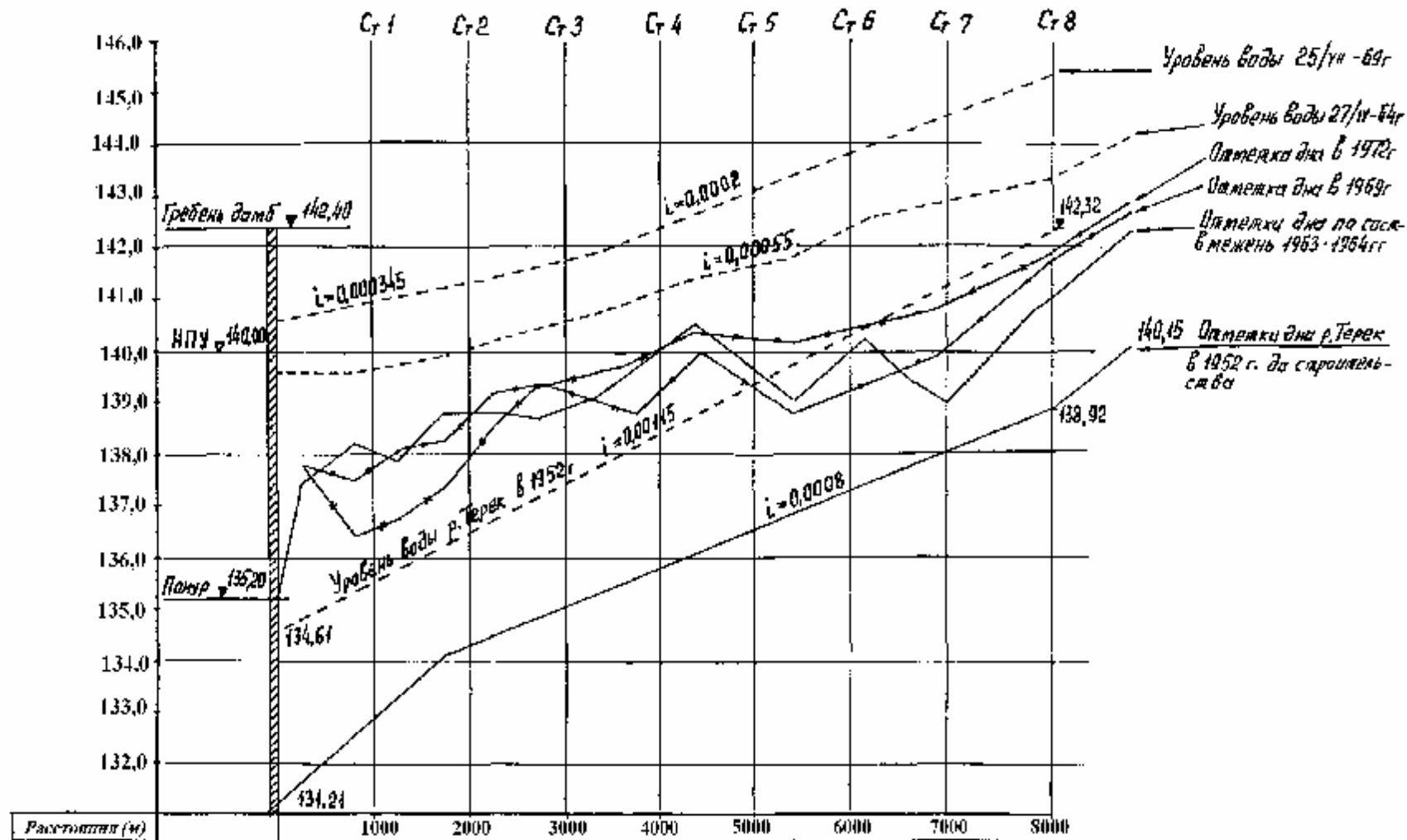


Рис. 1. Интенсивность заиления верхнего бьефа Терско-Кумского гидроузла

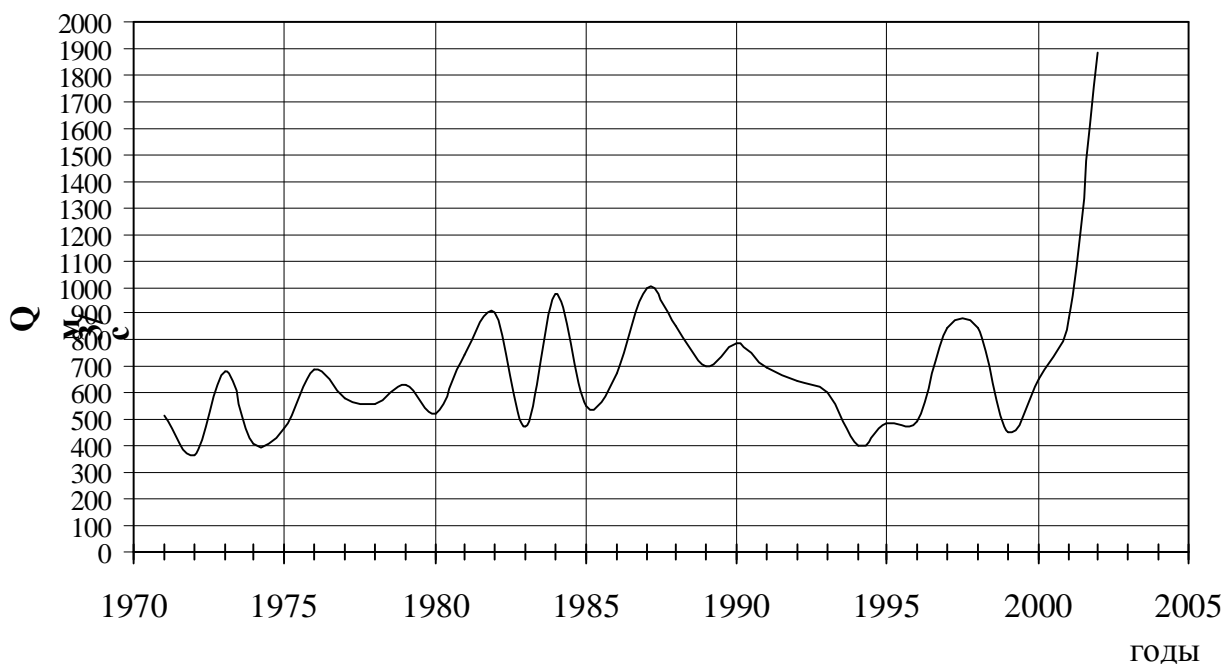


Рис.2 Максимальные расходы р. Терек в створе Терско-Кумского гидроузла

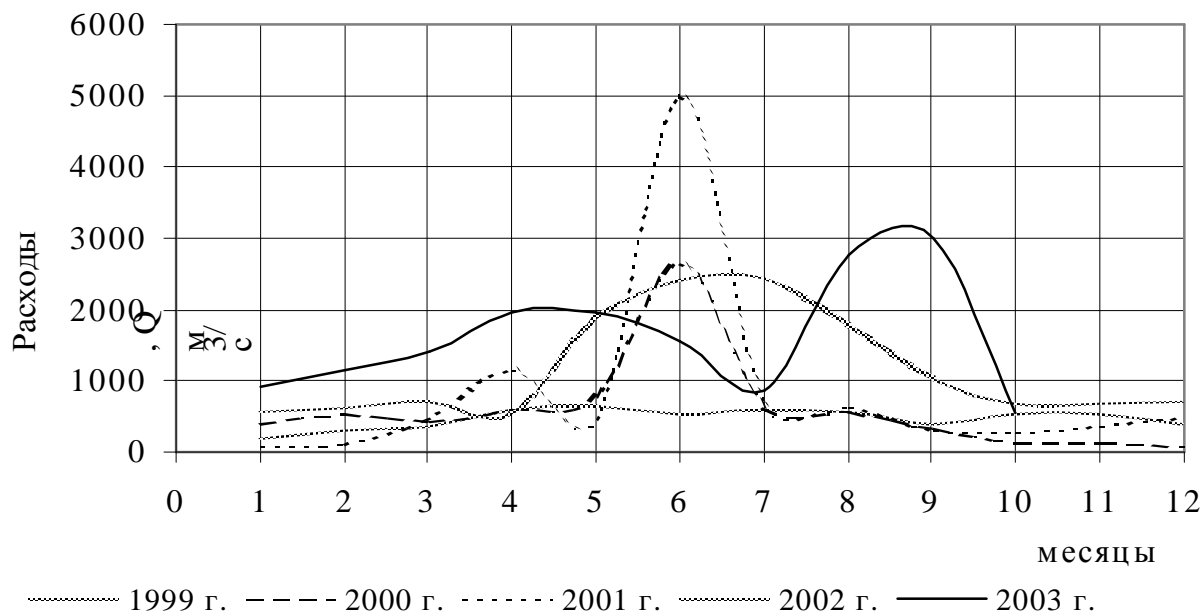


Рис.3 Максимальные расходы р. Кубань в створе Краснодарского водохранилища

В сложившихся условиях для обеспечения безопасности прохождения высоких паводков через гидроузлы необходима организация постоянного сбора и анализа информации по состоянию как самих гидротехнических сооружений, так и зон их влияния в верхнем и нижнем бьефах. Создание обширных баз дан-

ных и использование современных ГИС-технологий, обеспечивающих обработку больших объемов разнородной и пространственно распределенной информации, позволяет проводить разработку сценарных вариантов аварийных ситуаций, определение риска катастрофических наводнений для схем страхования, выбор противопаводковых мероприятий и т.д.

При выборе противопаводковых мероприятий, помимо использования традиционных схем очистки водохранилищ от донных отложений (сочетание механической очистки с глубокими гидравлическими промывками и гидравлическими промывками по полосам, разработанными во ВНИИГиМ) [1] и берегоукрепительных мероприятий, необходимо разработать новые технические решения. Это, в частности, относится к разработкам, направленным на отведение определенной части паводковых расходов через дополнительные водосбросные сооружения (например, создаваемые по типу «размываемых вставок»).

Водосбросные сооружения типа «размываемая вставка» получили довольно широкое распространение за рубежом (США, Австралия). Данное сооружение представляет собой обычную каменно-набросную плотину с экраном или ядром, которая автоматически размывается при катастрофическом паводке. В отличие от обычных каменно-набросных или земляных плотин РВ имеют обычное бетонное основание для предотвращения опасных размывов, которые могут возникнуть после полного разрушения вставки [2].

В качестве дополнительных водосбросов могут быть использованы естественные понижения местности (заброшенные карьеры, старицы и т.д.). Примером организации подобных сбросов могут служить исследования ВНИИГиМ пропуска высоких паводков по пойме р. Иртыш, перегороженной земляной плотиной (проект гидроузла Новый при переброске части стока сибирских рек). В этих исследованиях был отработан вариант использования русел рек, протекающих по террасам вблизи коренных берегов р. Иртыш, для организации дополнительного сброса паводковых расходов с минимальным нарушением природного ландшафта [3].

Таким образом, процедура выполнения Закона «О безопасности гидротехнических сооружений» должна включать все стадии жизненного цикла гидросооружений: от их планирования, проектирования, строительства, оперативного управления, эксплуатации до утилизации.

Как показывает опыт эксплуатации крупных гидроузлов ирригационного назначения, расположенных на реках, несущих обильные наносы, на стадии проектирования практически не учитывается заиление водохранилищ, что приводит к опасным последствиям при пропуске высоких паводков, способствует нарушению режима работы головных водозаборных сооружений вследствие заиления головных участков магистральных каналов. Продолжение изучения данной проблемы на базе накопленного во ВНИИГиМ многолетнего опыта исследований позволит уточнить предельные значения параметров функционирования гидроузлов ирригационного назначения и разработать новые конструктивные решения по противопаводковым мероприятиям, уменьшающим вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Литература

1. Наумова Т.В. Мероприятия по сокращению заилиения верхних бьефов гидроузлов. – Всероссийский конгресс работников водного хозяйства/Тезисы докладов. – МПР, Москва: декабрь 2003 г., с.168 – 169.
2. Наумова Т.В., Пикалова И.Ф. Новые конструкции водосбросных сооружений типа «размываемая вставка». – ЦБНТИ, Экспресс- информация, 1984, серия5, вып.15, с.3 – 9.
3. Тер-Абрамянц Г.А., Наумова Т.В., Хавлошвили Э.О. и др. Гидравлические исследования компоновок и конструкций Нового гидроузла на Нижнем Иртыше. - /Научно-технический отчет ВНИИГиМ/: М.,1986, 170 с.

УДК: 626.823

СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДОВ ПЛОТИННЫХ ВОДОЗАБОРОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.А. Сидорова, к.т.н.

ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

В гидротехнических сооружениях плотинных водозаборных узлов, рисунок 1, в связи с непрерывным изменением расходов и уровней воды в водоисточнике (1) необходимо непрерывное маневрирование затворами водосбросной плотины (2) для поддержания НПУ и затворами водозаборного шлюза-регулятора (3) в голове магистрального канала для обеспечения графика водоподдачи.

В том случае, когда водозабор является единственным водопотребителем и обязательное поддержание НПУ не диктуется другими водопользователями, возникает возможность упрощения схемы управления затворами сооружений гидроузла предлагаемым ниже способом (SU 1233113 А 1).

Суть способа состоит в отказе от поддержания фиксированной отметки НПУ и введении допустимого диапазона колебаний уровня в верхнем бьефе гидроузла. Верхний допустимый уровень диапазона (ВДУ) совпадает с форсированным уровнем верхнего бьефа, определенным проектом для данного гидроузла. Нижний допустимый уровень диапазона (НДУ) определяется условиями, при которых еще возможен забор воды через шлюз-регулятор в соответствии с графиком водопотребления.

При колебаниях уровней верхнего бьефа в допустимом диапазоне массивные затворы водосбросной плотины остаются неподвижными, а регулирование расхода водозаборного шлюза (в соответствии с графиком водоподдачи) достигается маневрированием только его затворами.

Неподвижное положение затворов водосбросной плотины, при котором уровень верхнего бьефа может находиться в допустимом диапазоне колебаний как можно дольше, определяется прогнозными гидрологическими и гидравлическими расчетами реки-водоисточника.

Затворы водосбросной плотины включаются в работу только при выходе уровня верхнего бьефа из допустимого диапазона и устанавливаются в новое расчетное неподвижное положение.

Предлагаемый способ существенно сокращает объем маневрирования тяжелыми затворами водосбросной плотины и позволяет достичь до 25% экономии электроэнергии.

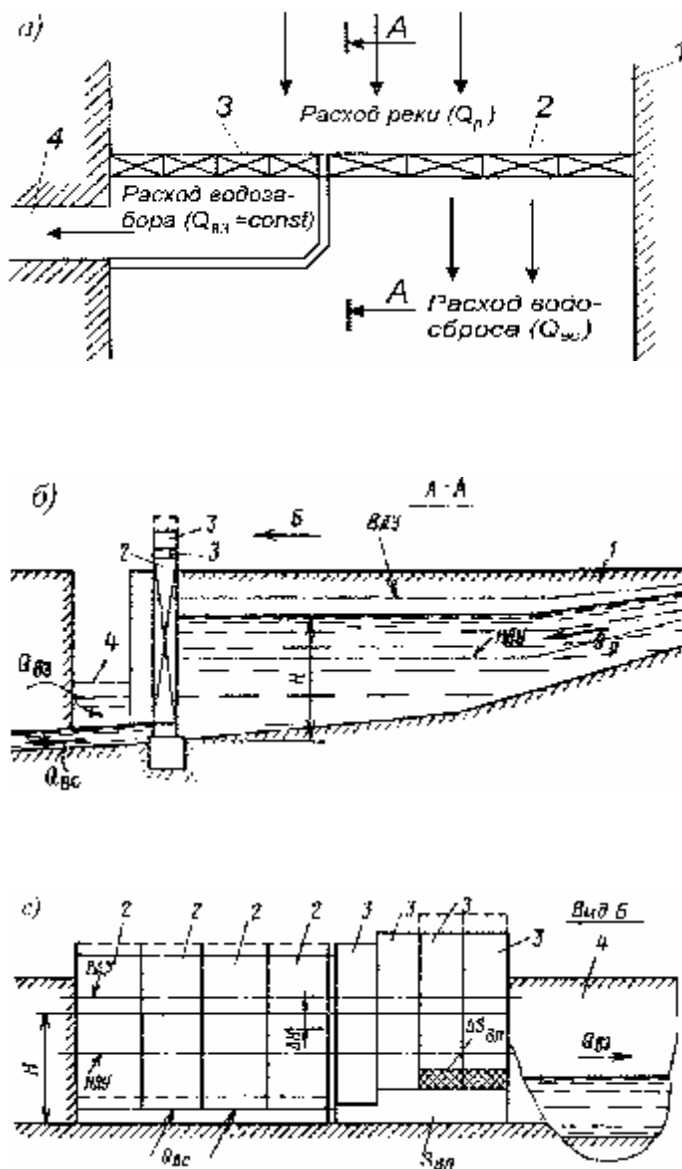


Рис. 1. Способ регулирования расходов плотинных водозаборов:
 1 – водоисточник; 2 – затворы водосброса; 3 – затворы водозабора;
 4 – отводящий канал

Литература

1. Гидротехнические сооружения. Под ред. Гришина М.М. М., «Высшая школа», 1979.
2. Сборник докладов Всесоюзного совещания по водозаборным сооружениям и русловым процессам. Ташкент, 1974.
3. Справочник по гидротехнике. Гос. Изд-во литературы по строительству и архитектуре. М., 1955.
4. Мелиорация и водное хозяйство. 4. Сооружения: М47 Справочник/Под ред. П.А. Поладзаде. – М., Агропромиздат, 1987.

УДК 532.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ ФОТО-ВИДЕОАППАРАТУРЫ

Е.Г. Филиппов, д.т.н., Б.А. Чавтараев, к.т.н., А.М. Кушер, к.т.н.
ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

Использование фото и киносъемки в гидравлических исследованиях началось во ВНИИГиМ вскоре после организации института. Фотоаппаратура использовалась для съемки моделей гидротехнических сооружений, фиксации линий тока с применением красителей, рельефа дна и донных наносов. Фото и киноаппаратура применялась для определения поверхностных скоростей водных потоков с использованием различных видов поплавков. Самой объемной и крайне длительной являлась процедура ручной обработки фото или киноматериалов. Для измерения перемещений передвигающихся поплавков каждый кадр фото или киноплёнки проектировался на экран и затем вручную измерялись расстояния между положениями поплавков в смежных кадрах [1]. Дальнейшее применение фото и киносъемки было направлено на разработку метода измерения статистических характеристик открытых турбулентных потоков с использованием шариков неразрываемой эмульсии с удельным весом, близким к идеальному весу воды [2]. В 60-80 гг. прошлого столетия фото и кинематографические методы измерений используются при исследовании структуры потока на моделях водозаборных гидроузлов [3] и гидрометрических сооружениях [4].

Трудоемкость процесса обработки данных на кино-фотоматериалах оставалась препятствием для использования фото и кинематографических методов измерения гидравлических параметров и структуры потоков. Применение полуавтоматических устройств для обработки фото-киноматериалов и импортных кинодешифраторов не ликвидировало применение ручного труда [4]. По-прежнему для обработки тысяч точек измерений в двух-трех опытах требовалось несколько месяцев непрерывной работы.

Для автоматизации процесса видеосъемки, первичной обработки измерительной информации и определения гидравлических параметров в открытых руслах и при движении потоков в гидротехнических и гидрометрических сооружениях во ВНИИГиМ разработан телевизионный метод [5,6,7]. Для реализации телевизионного метода была разработана и изготовлена измерительная система, позволившая соединить процессы видеосъемки с математической обработкой данных на ЭВМ [8,9].

Измерение скоростных параметров потока телевизионным методом выполняется в следующей последовательности [5]. Исследуемый поток визуализируют с помощью взвешенных мелкодисперсных частиц-индикаторов. Регистрация их движения производится в дискретные моменты времени путем периодического импульсного преобразования изображений частиц исследуемой области потока в потенциальный рельеф на чувствительной поверхности фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) и измерения временных интервалов между синхроимпульсами разверток и видеоимпульсами от частиц в процессе

сканирования поверхности ФЭП. После определения координат с помощью ЭВМ находятся траектории движения отдельных частиц. По найденным перемещениям за известный интервал времени определяются мгновенные скорости потока, которые служат исходными данными для вычисления статических характеристик турбулентного потока.

Автоматизированная телевизионная система ТИССА, реализующая этот способ измерений, включает два импульсных источника света с общим блоком питания, две видеокамеры с общим синхрогенератором, генератор электрической сетки, устройство управления засветкой, аналоговый и цифровой видеоканалы, устройства управления, блоки кодирования, калибровки изображения и контроля работоспособности системы, буферное запоминающее устройство, цифровой накопитель, интерфейс ввода-вывода и компьютер [9].

В зависимости от конфигурации предусмотрена работа системы в реальном масштабе времени и в режиме пост-обработки. Предусмотрены следующие варианты исследований:

- измерение полей скоростных характеристик в одном сечении потока;
- измерение полей скоростей одновременно в двух различных сечениях (например, при исследовании гидротехнических сооружений);
- определение объемного распределения 3-х составляющих скоростей с использованием двух видеокамер, оси оптических систем которых взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, нормальной к вектору средней скорости потока. Так как развертки обеих камер синхронизированы, координаты частиц по одноименным осям совпадают, что позволяет определять их X, Y и Z - координаты в выделенном объеме и, в конечном итоге, получать трехмерное распределение скоростей;
- исследование лагранжевых характеристик.

Для расширения исследуемой области с применением двух видеокамер частично совмещаются их поля зрения так, чтобы одна из реперных отметок, задающих ориентацию и масштаб изображения, была общей. Объединение изображений выполняется на программном уровне в ПЭВМ.

Математическое обеспечение телевизионной измерительной системы позволяет решать следующие задачи: коррекция геометрических искажений; переход от аппаратной системы координат к физической; определение траекторий и мгновенных скоростей; расчет полей средних и пульсационных скоростей; расчет вероятностных, корреляционных и спектральных характеристик турбулентности.

Языки программирования разработанного программного комплекса "ТИССА" - Паскаль, Фортран.

Измерительная система применялась в исследованиях русловой турбулентности и гидрометрических свойств перепадов [11]. Некоторые результаты использования этой системы при исследовании русловой турбулентности представлены на рисунке 1.

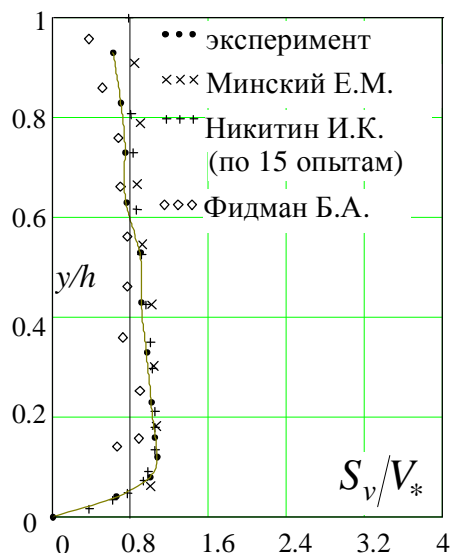


Рис. 1. Измеренный профиль поперечных пульсаций скорости в равномерном потоке в сопоставлении с результатами других авторов

В последние годы большое распространение получили цифровые видеокамеры, предназначенные для любительской и профессиональной видеосъемки. Применение цифровых видеокамер для измерения гидравлических параметров имеет свои положительные и отрицательные свойства. К положительным свойствам следует отнести: компактность аппаратной реализации; большая чувствительность видеокамер, позволяющая производить видеосъемку при малой освещенности объекта исследований; возможность непрерывной замены цифровых карт памяти без освобождения предыдущих запоминающих карт от данных видеосъемки и компактное хранение видеокарт или видеопленки с цифровой видеозаписью с результатами измерений.

К числу отрицательных свойств относятся: наличие дополнительной геометрической погрешности, связанной с чересстрочностью вертикальной развертки; отсутствие возможности осуществлять видеосъемку с большой частотой кадров, за исключением видеокамер, имеющих механизм фотосъемки, отличный от стандарта вещательного телевидения (50- 60 Гц); низкая пространственная разрешающая способность, связанная с длительностью экспозиции и числом элементов запоминающей матрицы (ПЗС).

Цифровая импульсная фотосъемка используется в качестве самостоятельного метода и средства измерения гидравлических параметров. Интенсивное развитие в последние годы фототехники позволило снизить трудоемкость и длительность обработки фотоматериалов. Современная цифровая фототехника позволяет существенно облегчить и ускорить обработку полученных с помощью цифровой фотокамеры данных путем их непосредственного ввода в компьютер.

Современные цифровые фотоаппараты широкого применения создают изображение в цифровом виде на специальной фотоматрице, состоящей из большого количества фоточувствительных элементов. Каждый элемент состоит

из 4-х фотоприемников - 2-х для зеленого и по одному для красного и синего цветов. Количество пикселей является одной из основных характеристик аппарата, определяя предельное разрешение отснятого снимка. Другим важным параметром является размер фотоматрицы, на которую проектируется объективом оптическое изображение. Большой размер матрицы соответствует лучшему качеству цифрового изображения, т.к. расстояние между пикселями в этом случае больше, что уменьшает их взаимовлияние (уровень шумов) и соответственно искажения в свето- и цветопередаче объекта съемки. Это особенно важно при съемке с низкой освещенностью, что имеет место при импульсной съемке. Поэтому при выборе цифрового аппарата следует отдавать предпочтение аппаратам с большим размером матрицы, но с меньшим числом пикселей и наоборот.

Цифровые аппараты обладают большими возможностями, определяемыми числом установок в списке меню на дисплее, и позволяют проводить съемку движущихся и статических объектов в широком диапазоне освещенности, изменять размеры изображения, создавать видеоролики длительностью до двух-трех минут с озвучиванием каждого кадра и т.д.

Отметим некоторые особенности съемки водных потоков. Каждый кадр экспонируется 10-20 вспышками импульсной лампы. В наших исследованиях использовался целевой источник света с лампой ИСП-2000 с длительностью импульса – 25- 50 микросекунд. Для получения изображения точечных траекторий была необходима достаточно высокая фоточувствительность аппарата - в нашем случае не менее 400 ед. Такой чувствительностью обладают даже простые любительские камеры. Чувствительность полупрофессиональных и профессиональных фотоаппаратов достигает 1000 и более ед.

Следует также учесть, что число световых импульсов для каждого кадра определяет фоновую засветку всего изображения. Поэтому для ее уменьшения необходимо использовать чистую прозрачную воду, а стенки модели окрашивать в темные матовые тона, исключая образование бликов.

При выборе фотокамеры для съемки в таких условиях нужно обратить внимание на следующие из многих установок, которыми она обладает:

- а) возможность предварительной фокусировки на объект, которая не может быть изменена в процессе съемки;
- б) возможность установки неизменяемой при съемке экспозиции - значения выдержки и диафрагмы.

Таковыми свойствами обладают не все аппараты, особенно любительского класса, где все установки производятся автоматически в зависимости от условий съемки. В общем случае это удобно, но не пригодно для импульсной съемки.

Фотосъемка с использованием цифровой фотокамеры включает выполнение следующих операций:

- на исследуемой модели задается требуемый гидравлический режим с известным расходом воды;

- цифровой аппарат закрепляется на штативе напротив измерительного сечения модели и трансфокатором выбирается необходимый размер изображения в кадре;

- в исследуемую область в потоке устанавливается мерная (тестовая) штриховая или точечная шкала, по которой при искусственном освещении осуществляется фокусировка фотоаппарата. Мерная шкала фотографируется и в дальнейшем по ней определяется масштаб изображения для всех последующих кадров;

- на дисплее фотокамеры в режиме установок фиксируется постоянная выдержка затвора и максимальная апертура объектива. Выдержка затвора должна соответствовать частоте вспышек лампы, которая выбирается в зависимости от скорости водного потока. Например, при частоте вспышек 100 Гц для получения 10-20 точек в траектории выдержка затвора должна быть установлена в пределах 0,1...0,2 с;

- мерная шкала удаляется из потока, включается импульсная лампа, все другие источники света выключаются, в поток вводятся индикаторы;

- фотосъемка производится в момент прохождения индикаторов в исследуемом сечении.

Количество необходимых кадров определяется измеряемыми параметрами, а также оптимальной концентрацией индикаторов в потоке. Слишком большая их концентрация затрудняет выделение траекторий из массива цифровых данных при компьютерной обработке. Малая концентрация требует увеличения числа отснятых кадров для определения необходимых статистических характеристик.

Для обработки данных цифровой фотосъемки разработан пакет программ "Фото-ТИССА", обеспечивающий ввод информации в компьютер и расчет гидравлических параметров потока. После ввода данных цифровой фотосъемки в компьютер стандартными средствами (например, с применением системного драйвера Windows XP) формируется ряд файлов в графическом формате (например, JPEG) со сквозной нумерацией имени файлов. Разработанная специально для фотосъемки программа последовательно обрабатывает заданное число указанных файлов изображений в потоковом режиме. Цель обработки - выделение изображений частиц и определение координат их центров. Критерий выделения - заданный порог по яркости. Система координат, принятая в цифровой фотосъемке, аналогична телевизионному стандарту - начало отсчета в левом верхнем углу изображения. Размер матрицы данных зависит от разрешающей способности ПЗС светочувствительной матрицы фотоаппарата. Для изображения каждой частицы, составленного из набора смежных пикселей, вычисляется пара координат X, Y, соответствующих центру частицы, в аппаратной системе координат. Для случая съемки при недостаточной экспозиции предусмотрен учет влияния шумов. Данные обработки изображений записываются в файл и далее передаются в программу масштабирования и преобразования системы координат пакета "ТИССА".

В качестве образцового средства для фотоизмерений уровней воды в лаборатории гидрометрии использовали ранее разработанные автоматизированные прецизионные уровнемеры АПУ-250 [10].

Выводы

1. Цифровая фото-видеотехника может использоваться для измерений гидравлических параметров при возможности визуализации исследуемого водного потока.
2. Достоинством видеосъемки в сравнении с цифровой импульсной фотосъемкой является возможность исследования длительных нестационарных процессов, а недостатками - низкая частота измерений; малая пространственная разрешающая способность; дополнительная координатная погрешность, связанная с чересстрочностью вертикальной развертки.
3. К недостаткам цифровой фотосъемки следует отнести: невозможность измерения параметров потока, связанных с отсчетом времени, например, частотных характеристик; высокие требования к вычислительной системе, касающиеся частоты процессора, емкости оперативной и дисковой памяти. Размер исходных файлов (сотни Мбайт) и затраты машинного времени многократно превышают аналогичные параметры для телевизионной измерительной системы, не позволяя получать результаты измерений в процессе эксперимента.

Литература

1. Рагузин А. и Воскресенский Н. Опыт применения фото-киносъемки в лабораторных исследованиях по гидравлике. Труды ВНИИГиМ, том VII, Сельхозгиз, М.: 1932
2. Минский Е.М. Турбулентность руслового потока. Гидрометеиздат, Л.: 1952
3. Филиппов Е.Г. Исследования структуры потока перед средненапорными гидроузлами с послонной схемой водозабора. Тр.САНИИРИ, вып.100, Ташкент: 1961
4. Филиппов Е.Г. Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков. Гидрометеиздат, Л.: 1990
5. Филиппов Е.Г., Кушер А.М. Способ измерения скоростных характеристик потока жидкости. Автор.свид. №581435//Бюллетень "Открытия, изобретения..." №43, 1977
6. Кушер А.М., Филиппов Е.Г. Способ измерения скоростных характеристик потока жидкости. Автор. свид. № 109 3980 // Бюллетень "Открытия, изобретения..." №19, 1984
7. Филиппов Е.Г., Кушер А.М. Телевизионный метод измерения кинематических характеристик турбулентных потоков//Гидротехника и мелиорация, №5, 1981
8. Филиппов Е.Г. Автоматизация измерений и обработка данных в научных экспериментах // Современные проблемы мелиорации земель/ВНИИГиМ: сб. Научные труды, М.: 1979
9. Кушер А.М. Разработка и применение новых методов исследования кинематической структуры водного потока. Автореф. канд.дисс. М.: 1999
10. Трифионов С.Д., Чавтараев Б.А. Метрологическая аттестация и испытания прецизионных уровнемеров// Методы и средства автоматизации научных исследований в гидротехнике и мелиорации //ВНИИГиМ, Сб. научн. трудов, М.: 1981
11. Кушер А.М. Исследование структуры потока на перепаде в лотке прямоугольного профиля. В сб. "Гидравлика и расчет гидросооружений", М.: ВНИИГиМ, 1984, с. 147-153.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА В РЕКАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ

А.О. Щербаков, к.т.н., А.А. Талызов, Е.Э. Головинов
ГНУ ВНИИГиМ, Москва, Россия

В ходе выполнения международной Российско-Германской программы Волга-Рейн, реализуемой с 1999 г. Минпромнауки России и министерством образования Германии, в рамках проекта "Каскад" во ВНИИГиМ совместно с МГУП и ННГАСУ были разработаны технологии моделирования речного стока, на основе которых планируется создать компьютерную автоматизированную систему управления гидроузлами Волжско-Камского каскада. Система предназначена для оптимизации режимов регулирования уровней в бьефах гидроузлов каскада и решения следующих задач: увеличение выработки электроэнергии; минимизация площадей затопления территорий при прохождении паводков; обеспечение подачи необходимых расходов воды водопользователям; улучшение экологической ситуации бассейна; создание благоприятных условий для эксплуатации водного транспорта.

В рамках проекта была создана цифровая модель рельефа (ЦМР) долины р. Волги от г. Твери до Чебоксарского гидроузла, включающая Ивановское, Угличское, Рыбинское, Нижегородское, Чебоксарское водохранилища, общей протяженностью около 1200 км. Модель рельефа создана на основе крупномасштабных топографических карт, дополненных в русловой части лоцманскими картами, что обеспечило высокую точность созданной модели. Модель послужила источником высокоточных топографических данных для решения многих задач, основные из которых – гидравлические расчеты и отображение территорий затопления долины реки.

Для одномерной гидродинамической модели источником данных о геометрии русла служил набор поперечных сечений, полученный с помощью ЦМР. Для создания набора поперечных сечений требовалось произвести ряд геометрических преобразований и вычислить отметки высот для каждой точки в каждом сечении. Набор сечений должен обновляться при каждой модификации цифровой модели рельефа, а также при изменении их пространственного положения, то есть несколько раз при создании модели и периодически в процессе ее использования. Для решения этой задачи в отделе гидротехники ВНИИГиМ была разработана программа Profile Utility, позволяющая в интерактивном режиме создавать набор сечений для модели рельефа, представленной в виде регулярной сети (GRID). Программа была успешно применена при создании гидравлической модели каскада волжских гидроузлов.

На основе топографических данных из ЦМР была создана численная гидродинамическая модель имитации режима потока в реке. Моделировалась как русловая часть водохранилищ, так и пойменная. Модель позволяет рассчитывать уровни свободной поверхности воды и, посредством наложения на цифровую высотную модель местности, с высокой точностью определять границы

площади затопления долины реки. На основе численной гидродинамической модели ведется разработка системы поддержки принятия решений для персонала, отвечающего за управление гидроузлами. Основное назначение системы – прогнозирование ситуаций, возникающих при пропусках различных расходов воды. Совместными усилиями института водного хозяйства и культуртехники университета Карлсруэ (ФРГ), ВНИИГиМ, МГУП, ННГАСУ создан рабочий прототип такой системы - DSS-Wolga (Decision Support System - Wolga). Система предназначена для поддержки принятия управленческих решений на каскаде волжских гидроузлов и представляет собой модель части каскада, включающую Рыбинский, Нижегородский и Чебоксарский гидроузлы. Система функционирует совместно с ГИС ArcView, имеет графический пользовательский интерфейс, соответствующий современным требованиям к программному обеспечению (рис. 1).

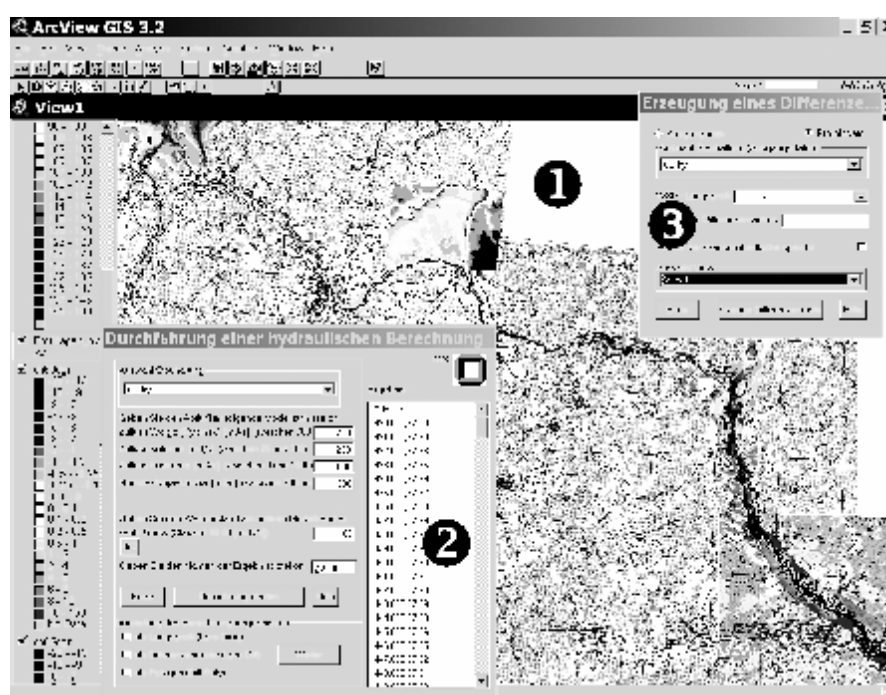


Рис. 1. Графический интерфейс системы поддержки принятия решений (DSS-Wolga):

- 1) главное окно - отображение карт, модели рельефа, территорий затопления;
- 2) окно задания параметров гидродинамических расчетов;
- 3) окно управления отображением территорий затопления

Входными данными системы являются:

- цифровая модель рельефа;
- данные о морфологии русла (набор поперечных сечений, значения коэффициентов шероховатости);
- топографические карты;
- дополнительная информация (расположение населенных пунктов, предприятий, данные аэрофотосъемки, космические снимки);

- значения расходов воды на верхней границе участка основного русла и по притокам.

Выходные данные:

- координаты кривых свободной поверхности потока;
- карты глубин для территорий затопления;
- информация о населенных пунктах, подвергшихся затоплению.

С помощью системы были проведены расчеты для различных расходов воды через гидроузлы и притоки, а также различных уровней верхнего бьефа гидроузлов. По результатам гидравлического моделирования были построены карты затопления долины Волги для различных прогнозируемых ситуаций. Результаты моделирования показали высокую сходимость с измеренными в природе значениями. На рисунке 2 приведены кривые свободной поверхности потока, полученные в результате гидродинамических расчетов на Чебоксарском водохранилище. Аналогичные расчеты проводились для Рыбинского и Нижегородского водохранилищ.

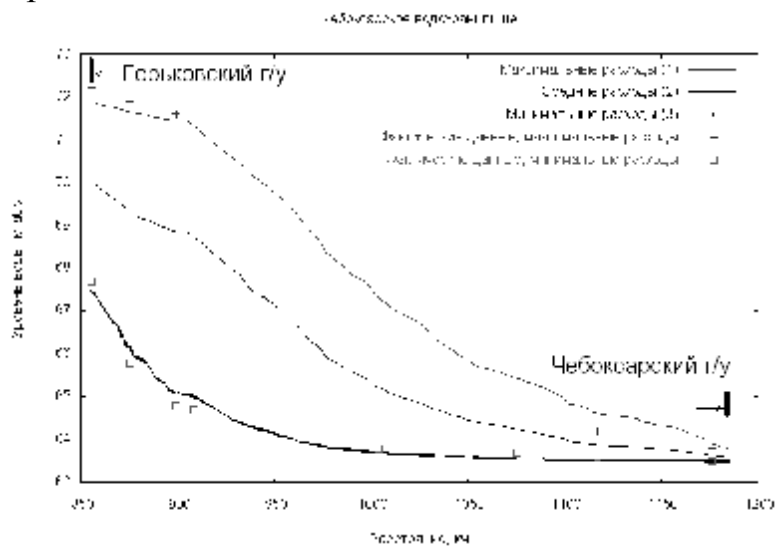


Рис. 2. Кривые свободной поверхности потока, полученные в результате гидродинамических расчетов на Чебоксарском водохранилище

По результатам гидродинамического моделирования были созданы карты затопления долины Волги для различной водности реки. Эти карты были построены на основе дифференциальной модели, полученной как разность между отметками рельефа и уровня воды. Отрицательные значения в такой модели соответствуют глубинам затопления, положительные – высотам местности над уровнем воды. На рисунке 3 показана карта долины Чебоксарского водохранилища, построенная таким образом.

В ходе выполнения работ особое внимание уделялось средствам отображения получаемой информации. Помимо встроенных в ГИС средств, использовались собственные разработки, в частности, программа трехмерной визуализации. Программа позволяет отображать участки ЦМР с различных точек наблюдения, приближать и удалять исследуемый объект, может быть использована для построения реалистичных изображений территорий затопления, включая постройки и другие хозяйственные объекты. На рисунке 4 приведен пример

изображения долины р. Волги, построенный средствами трехмерной компьютерной графики.



Рис. 3. Карта затопления долины Чебоксарского водохранилища при максимальных расходах, соответствует кривой 1 на графике

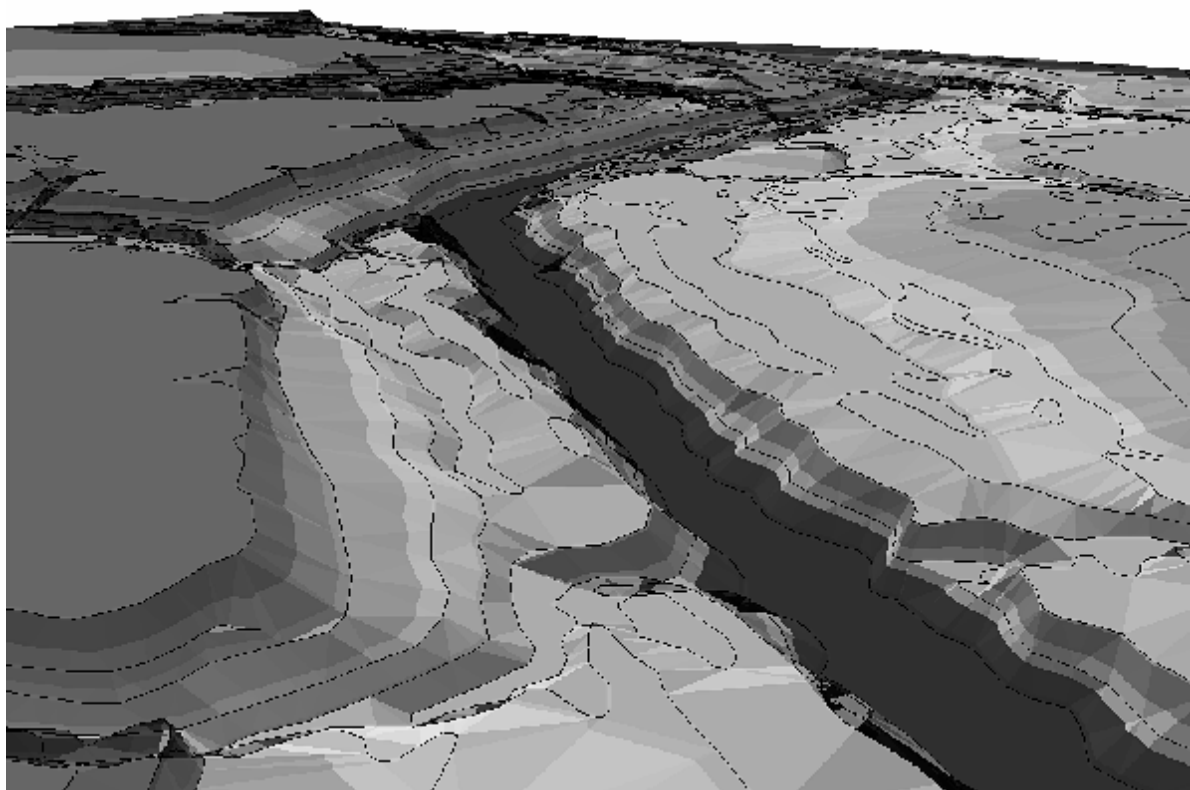


Рис 4. Отображение территорий затопления с использованием средств трехмерной компьютерной графики

Созданная ЦМР протяженного участка долины Волги и построенная на ее основе гидродинамическая модель позволяет с высокой точностью определять границы площадей затопления и создавать карты глубин при различных режимах эксплуатации каскада гидроузлов. Пакет программ поддержки принятия решений позволяет эффективно моделировать ситуации, возникающие при различных режимах эксплуатации каскада гидроузлов. Графический интерфейс