

Развитие и совершенствование конструкций водопропускных сооружений Ларьков В.М. (БГСХА)

Актуальность поиска новых технических решений. Эффективность водохозяйственных объектов, во многом определяется уровнем их инженерно-технического оснащения и, в первую очередь, многочисленными водопропускными гидротехническими сооружениями, которые в комплексе с другими сооружениями призваны обеспечить аккумуляцию стока, его распределение, управление водным режимом объекта.

Многие годы в водохозяйственном строительстве применяются сооружения массивной конструкции. Еще в 80-е годы на возведение водосбросного сооружения низконапорного речного гидроузла на расход воды до 150-200 м³/с требовалось до 4 тыс.м³ бетона и железобетона, а на 1000 га осушительно-увлажнительной сети приходилось от 40 до 55 сооружений с расходом бетона и железобетона от 0,5 до 1,2 м³ на 1 га мелиорируемой площади. Поиски путей удешевления водопропускных сооружений привели к созданию ряда усовершенствованных типов и конструкций. Однако, несмотря на достигнутые положительные результаты, удельная материалоемкость и стоимость водопропускных сооружений остается весьма высокой. Техничко-экономический анализ показывает, что на строительство водопропускных сооружений приходится от 30 до 60% стоимости всего объекта (речного гидроузла, мелиоративной системы). При этом удельные материальные затраты (на один кубометр расчетного расхода воды) составляют: для водосбросных сооружений речных низконапорных гидроузлов: бетона – 5...30 м³, арматурной стали – 0,5...3 т; для сооружений на мелиоративных каналах: бетона – 2...8 м³, арматурной стали – 0,6...2,5 т., т.е. удельные затраты по аналогичным объектам могут различаться в 4...6 раз.

Следовательно, проблема ресурсосбережения на строительстве мелиоративных и водохозяйственных объектов – это важная народно-хозяйственная проблема, решение которой требует разработки и внедрения новых ресурсосберегающих типов и конструкций гидротехнических сооружений, осуществляемых с учетом многофакторных условий их эксплуатации.

Одним из наиболее реальных путей развития и совершенствования сооружений (уменьшение капитальных и материальных затрат, повышение производительности труда) является разработка и

внедрение сооружений облегченной конструкции, в которых наиболее полно используются физические свойства строительного материала в результате применения рациональных статических моделей и более совершенных технологий, за счет активного взаимодействия системы – «сооружение – среда».

Основные принципы оптимизации облегченных конструкций нового технического уровня. Качество нового технического уровня, во многом, определяется полнотой и умением правильного применения основных принципов рационального инженерного творчества, выработанных теорией и практикой наивыгоднейших конструктивных форм и параметров:

- наименьшей массы конструкции можно достигнуть при передаче усилий и нагрузок по наикратчайшему пути и, по возможности, по прямой;
- облегчению строительно-подпорную модель можно получить путем создания пространственной и совместной работающей статической модели «сооружение-среда» (грунтовая, водно-воздушная и т.п.);
- у рациональной конструктивной формы, каждая ее деталь, должна быть работающей и выполнять как можно больше функций;
- для получения наиболее экономичных конструктивных изделий необходимо стремиться к их равнопрочности, к равномерному предельному нагружению материала по всему сечению;
- применять наиболее простую, но совершенную индустриальную технологию: использовать простейшие унифицированные элементы и узлы, уменьшать модификацию и типоразмеры сооружений;
- разрабатывать новые совместимые конструктивные элементы, снижающие до минимума степень отказа и брака при строительстве и эксплуатации сооружения или конструкции;
- создавать рациональные конструктивные формы, которые обеспечивают эффективное взаимодействие потока и сооружения т.е. наиболее полно учитывают гидравлические, статистические и эксплуатационные условия его работы.

Выбор направления исследований. Из множества применяемых типов водопропускных сооружений, особую группу составляют сооружения массового применения, которая оказывает основное влияние на технические и экономические показатели водохозяйственных объектов. Совершенствование сооружений этой группы определяет перспективу технического развития и направление научных исследований в этой области гидротехники. При определении состава сооружений этой группы можно использовать статистический подход,

в основу которого, в качестве определяющих критериев положен индекс частоты практического использования сооружения — $U_r = n_i / N_{\text{общ}} \cdot 100\%$ и коэффициент относительного объема бетона $p_b = W_i / W_{\text{общ}}$, где n_i — число сооружений данного (i -го) типа в общем аналитическом ряду $N_{\text{общ}}$; W_i — приведенный объем бетона i -го типа; $W_{\text{общ}}$ — суммарный объем приведенного бетона сооружений всего ряда. Согласно этой методике, в основную группу включают те сооружения, у которых наиболее высокие показатели U_r , а суммарная частота их применения и суммарный коэффициент относительного объема бетона составляют значительную часть, например, не менее 60...70%.

Применяя такой методический подход были систематизированы, проанализированы и статистически обработаны материалы 260 типовых и индивидуальных проектов гидротехнических сооружений различного типа.

Результаты статистической обработки показали, что на низконапорных речных гидроузлах наиболее часто применяют сооружения башенного типа (29%), ковшового типа (22%). Третье место по частоте применения (19%) занимают открытые русловые (пойменные) водосбросы — водосливные плотины и водопропускные шлюзы. На мелиоративных системах (каналах) основную группу составляют водопропускные трубчатые сооружения (более 60%). Из них на долю сооружений с расходом до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ приходится 90-95%. Как видно, сама практика представила эти четыре группы сооружений массового применения, которые прежде других, должны быть основным предметом дальнейших исследований.

Методический подход к обоснованию рационального типа и конструкции сооружения. При разработке сооружения нового технического уровня рекомендуется использовать системно-модульный подход, согласно которому, гидротехническое сооружение, как сложная инженерная модель отображается в дискретном (модульном) виде, где каждый модуль рассматривается в виде «автономного» устройства. Такой подход, во многом, упрощает решение проблемы, поскольку дает возможность вести ее осуществление на основе оптимизации конкретных видов модульного комплекса, на принципах и правилах рационального конструктивного формообразования, на использовании показателей эффективности взаимодействия потока, основания и сооружения.

При реализации этой методики возникает ряд вопросов. Какие типы модулей необходимо совершенствовать? По логике совершенствовать можно и нужно все. А по существу? С точки зрения теории и практики, следует рассматривать, прежде всего те, которые имеют важное и существенное научное и практическое значение. Но как определить очередность объекта (модуля) исследований? По каким критериям установить его значимость? Ввиду многофакторности поставленной задачи, для упрощения ее, решения в качестве определяющего критерия следует принимать экономический показатель модуля или его «экономический вес» в конструкции сооружения. Именно этот показатель, с практической точки зрения, является наиболее существенным. Другие факторы можно рассматривать производными первого.

Применяя системно-модульный подход к наиболее распространенным типам водопропускных гидротехнических сооружений, на основе анализа технико-экономических показателей установлено, что у открытых регулируемых русловых сооружений – сливных плотин почти половина удельных затрат (до 50%) приходится на головную (сливную) часть. У трубчатых водосбросных сооружений (ковшовых, башенных) достаточно высокими остаются затраты на устройство нижнего бьефа (до 30% и больше).

Полученные результаты послужили основанием для выбора этих модулей в качестве конкретных объектов дальнейших исследований.

Для обоснования нового рационального технического уровня рекомендуется применять способ технико-экономического сопоставления, в сочетании с другими общепринятыми и специальными критериями оптимизации, например: коэффициентом гашения энергии $\eta_E = E_2 / E_1$; коэффициентом размываемости русла $\eta_{ар} = a_p / h_{кр}$; коэффициентом пропускной способности (коэффициентом расхода m ; μ) и т.п. В качестве экономических показателей можно принять: удельную стоимость сбросного расхода, его мощности: $c_Q = C / Q$; $c_q = C' / q$; $c_N = C / N$; удельных затрат материала (бетона) на единицу сбросного расхода и его мощности: $B_Q = B / Q$; $B_q = B / V$; $B_N = B / N$ и др.

Для реализации этого методологического подхода, а точнее определения параметров оптимизации необходимо иметь физические, гидравлические и другие параметры конструкции или сооружения нового технического уровня. Эти данные получают, как правило, в

результате научного поиска и методического обоснования с привлечением натурных и лабораторных исследований, математического моделирования и др.

Примеры и результаты некоторых методологических реализаций и исследований. В качестве примеров рассмотрены: сливной модуль плотины речного гидроузла, устройство нижнего бьефа для лотковых водосбросных сооружений, устройство нижнего бьефа для регулирующих трубчатых сооружений.

При проведении исследований этих модулей использовались общепринятые методы гидравлики, математическое моделирование с использованием ЭВМ. Широко использовались лабораторные и натурные исследования. Лабораторные опыты проводились на физических жестких и размываемых моделях с соблюдением геометрического, динамического и кинематического подобия с применением теории планирования эксперимента, стандартной и специальной аппаратуры.

1. Водосливная плотина речного гидроузла. При возведении гидроузлов на речных водотоках с значительным бытовым расходом часто используют бетонные (железобетонные) плотины. Применяемые конструкции сооружений этого типа характеризуются высокой удельной стоимостью и материалоемкостью. Анализ типовых и индивидуальных проектов, научных работ, посвященных этому разделу гидротехники показывают, что объем капиталовложений на возведение водосливных плотин составляет от 50% до 70% от общей стоимости речного гидроузла, а на 1 м³/с расчетного сбросного расхода приходится 0,5...3 т арматурной стали. Высокая стоимость применяемых водосливных плотин обусловлена не только особенностью эксплуатационных условий и требований. Здесь сказывается и традиционный гравитационный подход к обоснованию статической модели «слив-водобой-рисберма», в которой не полностью (до 50%) используются физико-механические свойства строительного материала, современные достижения в области гидравлики. Известные железобетонные сооружения остаются достаточно сложными по конструкции и технологии.

Согласно правилам рационального инженерного творчества, статически рациональной можно считать такую модель сооружения, у которой геометрические ее формы и размеры позволяют наиболее полно использовать механические свойства строительных материалов и обеспечить эффективное взаимодействие системы «сооружение-основание». Гидравлически рациональной будет такая модель

сооружения, которая наиболее полно удовлетворяет условиям эксплуатации и строительства при наименьших затратах. Этим требованиям в большей мере отвечает предложенная конструкция плотины с решетчатым сливом и камерой гашения (ПРК, рис.1).

Водосливная плотина ПРК (А.с. СССР, 1019050) состоит из напорной стенки-диафрагмы, оголовка, сливной плиты-решетки, фундаментной плиты, которая со стороны верхнего бьефа имеет удлиненную консоль, а со стороны нижнего бьефа выполнена по типу водобойного колодца. В напорной стенке-диафрагме имеются донные отверстия для опорожнения водоема, пропуска строительных расходов и сброса части паводковых вод. Между напорной стенкой-диафрагмой, сливной плитой-решеткой и плитой-водобоем образуется камера-гаситель. Плотина такой конструкции обеспечивает сброс воды, льда и сора через гребень, полное опорожнение водохранилища через данные отверстия. Возможна совместная работа поверхностных и донных отверстий. Гидравлический эффект предложенной конструкции достигается за счет разделения потока, многократного дробления и соударения струй. Экономический эффект получен за счет сокращения длины водобоя и рисбермы, уменьшения объема тела плотины, соединения водослива и водобоя в единую фундаментальную плиту. В предложенной конструкции принят и исследован водослив практического профиля укороченных размеров, совмещенный с решетчатой плитой. Сливной оголовок, как показали последующие опыты, должен обеспечивать положительное давление сбросного потока на элементы решетчатого водослива и создавать необходимые размеры камеры, при которых решетчатый слив и камера активно включаются в работу и обеспечивают интенсивное гашение избыточной водной энергии.

На основе материалов комплексных исследований был разработан институтом Белгипровдхоз типовой проект: «Водосбросы открытого типа на расход воды от 50 до 700 м³/с».

Плотина новой системы построена в 1984 г. в качестве водосброса-водоспуска водохранилищного гидроузла комплексного назначения на р.Быстрая Могилевской области. Основное назначение водохранилища-гарантированное водообеспечение оросительной системы на площади 1820 га. Емкость водохранилища при отметке НПУ — 2 млн. 770 тыс. м³; полезная водоотдача из водохранилища — 2 млн. 200 тыс. м³; площадь зеркала при НПУ — 131 га, максимальный напор на сооружении — 8,5 м; расчетный паводковый расход через водосбросное сооружение — 150 м³/с. Экономический эффект составил

1050 м³ железобетона.

2. *Устройства нижнего бьефа решетчатого типа. (А.с. СССР 1528848); Облегченные конструкции водопропускных сооружений; Устройства НБ с решетчатым гасителем для трубчатых водосбросов// Мелиорация и гидротехника для условий Беларуси; Гасители энергии водного потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений на расход воды до 50 м³/с при напоре до 15 м. Т.П.Р.* Здесь в качестве наглядного примера эффективности применения объемно-пространственных форм в гидротехническом строительстве рассматривается устройство нижнего бьефа решетчатого типа.

В практике наиболее известны стационарные щелевые (гребенчатые) полы-трамплины (Уральские полы), решетчатые полы-гасители поплавкового типа и др. Гасители этого типа отличаются простой конструкции и низкой стоимостью. Наряду с достоинствами, применяемые конструкции имеют ряд существенных недостатков: низкую степень гашения водной энергии из-за пассивного взаимодействия решетки со сливным потоком, недостаточное стабилизирующее влияние на режим сопряжения при колебании уровня нижнего бьефа и изменении сбросного расхода, что приводит к образованию сбойности, большим размывам дна и берегов отводящего русла (до 0,5...1,5 Н₁); при низких уровнях и малых глубинах нижнего бьефа транзитный поток проникает через щели решетки и образует под ними существенные размывы. Для поплавковых шарнирно закрепленных полов-гасителей характерна раскачка водного потока и автоколебания конструкции, отрицательно влияющие на статическую работу сооружения и режим сопряжения. Отсутствие достаточного теоретического и конструктивного обоснования, системных экспериментальных исследований решетчатых гасителей явилось первопричиной ограниченного применения гребенчатых однорядных решеток-гасителей на практике.

На основе анализа известных работ, результатов экспериментальных исследований установлено, что течение потока через решетку представляет сложный физический процесс, связанный с разделением (дроблением) потока, изменением геометрических и кинематических его характеристик, образованием отрывных течений (рис.2). Структурное течение потока за решеткой формируется, в основном, относительными параметрами решетки, в частности, относительной шириной ее элементов и скважностью $\rho = S/d + S$, где d – ширина (толщина) элемента (стержня); S – ширина просвета.

За обтекаемым телом (решеткой) формируется, как правило, два род вихрей разной структуры и устойчивости. Наиболее устойчивыми являются регулярные, обычно двухмерные вихреобразования, получившие названия «дорожки» Кармана.

В общем случае, движение потока в следе за решетчатыми конструкциями может быть вихревым или турбулентным, устойчивым или неустойчивым, со слабой или интенсивной диссипацией избыточной кинетической и пульсационной энергии, с интенсивной или слабой размывающей способностью, т.е. решетчатый гаситель может работать эффективно или неудовлетворительно.

Рациональная форма и конструкция решетчатого гасителя должна удовлетворять двум главным условиям или требованиям: обеспечивать устойчивый режим движения вихревых течений при пропуске малоскоростных (ламинарных) потоков, интенсифицируя гашение пульсационной энергии в следе течения; стабилизировать турбулентный режим течения скоростных потоков и обеспечивать интенсивное гашение их избыточной кинетической энергии. Выполнение первого условия возможно в том случае, если решетка-гаситель будет генерировать устойчивую двухмерную систему вихрей (дорожку Кармана). Отсюда следует первый важный инженерный вывод – решетчатый гаситель должен иметь не плоскую, а пространственную конструкцию, а точнее – двухрядную или двухъярусную систему (рис.3). В такой конструкции, согласно критерию Крамана, расположение элементов решетки должно удовлетворять условию

$$K = \frac{C}{L_6} = 0,281, \quad (1)$$

где C – расстояние между элементами рядов или ярусов; L_6 – расстояние между элементами в ряду.

Выполнение второго условия возможно в том случае, если протекание потока через решетку будет устойчиво турбулентным. Отсюда вытекает второй инженерный вывод или инженерная задача – установить геометрические параметры элементов решетки такими, при которых обеспечивалось бы устойчивое турбулентное течение, которое возникает при числах Рейнольдса $Re_d > 5 \cdot 10^5$. Исходя из кинематической структуры потока в следе течения и геометрических параметров его структурных образований можно предположить, что взаимное положение элементов решетки будет наиболее рациональным в том случае, если будет обеспечено активное взаимодействие перемежающихся (пограничных) областей смежных следов течения.

Это условие можно записать в таком виде:

$$L = \frac{B_c}{2} + \frac{Y_{ц}}{2}; \quad \frac{B_c}{2} = \frac{Y_{ц}}{2} + Y_n, \quad (2)$$

где L – расстояние между элементами решетки; B_c – ширина следа течения; $Y_{ц}$ – ширина центральной области; $Y_{п}$ – ширина пограничного слоя.

Если принять по Кирхгофу $B_c = 2,4 \cdot d$;

по Хинцу $Y_{ц} = 0,6\sqrt{d(x + a)}$; (3)

длину $x = L_c = 2d$; $a = d$, (4)

получим: $Y_{ц} = 0,6\sqrt{3 \cdot d^2} = d$; (5)

$$Y_{п} = 1,2 \cdot d - 0,5 \cdot d = 0,7 \cdot d. \quad (6)$$

Тогда у рациональной конструкции решетки

$$L = 1,2 \cdot d + 0,5 \cdot d = 1,7 \cdot d; \quad (7)$$

$$S = L - d = 0,724 \cdot d; \quad (8)$$

$$\rho = \frac{S}{d + S} = \frac{0,7}{1,7} = 0,42; \quad (9)$$

$$L_6 = 2L = 3,4d \quad (10)$$

$$C = 0,281 \cdot 3,4d = 0,95 \cdot d. \quad (11)$$

Ширина стержней должна удовлетворять условию

$$R_{ед} = \frac{V \cdot d}{v} > R_{едт} = 5 \cdot 10^5.$$

или

$$d > \frac{R_{едт} \cdot v}{V}. \quad (12)$$

Результаты комплексных лабораторных и натуральных исследований решетчатых гасителей использованы институтом Белгипроводхоз для разработки типового проекта «Гасители энергии водного потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений на расход воды до 50 м³/с при напоре до 15 м» Мн.: Белгипроводхоз, 1992.

Натурные наблюдения за работой и техническим состоянием построенных сооружений подтвердили результаты теоретических и лабораторных исследований, показали надежность и эффективность решетчатых гасителей. Экономический эффект, согласно реальным проектным решениям, составил на построенных сооружениях от 18

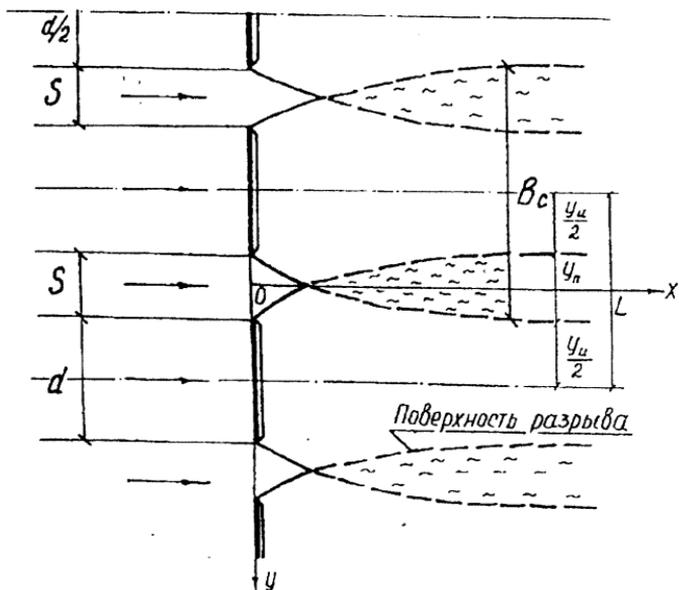


Рис.2. Картина следа течения за решеткой.

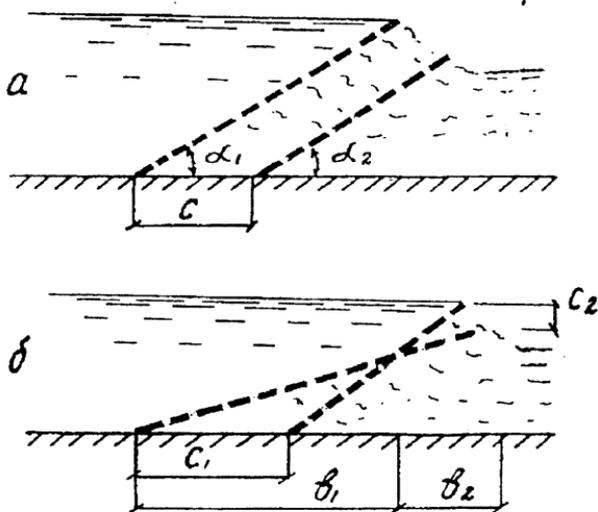


Рис.3. Рациональные конструктивные формы решетчатого гасителя: а – двухрядная; б – двухъярусная.