

А К А Д Е М И Я  Н А У К  У З Б Е К С К О Й  С С Р  
И Н С Т И Т У Т  В О Д Н Ы Х  П Р О Б Л Е М  И  Г И Д Р О Т Е Х Н И К И  
И Н С Т И Т У Т  Э Н Е Р Г Е Т И К И  И  А В Т О М А Т И К И

---

Э. Э. Маковский

А В Т О М А Т И Ч Е С К О Е  Р Е Г У Л И Р О В А Н И Е  
Р А С Х О Д О В  В О Д Ы  В  К А Н А Л А Х  С  
И С П О Л Ъ З О В А Н И Е М  Э Н Е Р Г И И  П О Т О К А

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ташкент 1960

А-3

Работа выполнена в Институте энергетики и водного хозяйства  
Академии наук Киргизской ССР

176665

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
А. Н. Киргизской ССР

Сдано в набор 26/VII 1960 г. Подписано в печать 9/VIII 1960 г. Формат  
бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,5 п. л.  
Д—05783 Тираж 150 экз. Зак. 1762/1

г. Фрунзе, тип. АН Киргиз. ССР.

Автоматизация производственных процессов является одним из главных направлений, развитием которых определяется коренное увеличение производительности труда для создания материально-технической базы коммунистического общества.

Внедрение комплексной автоматизации и механизации в различных отраслях народного хозяйства неразрывно связано с особенностями технологических процессов объектов автоматического регулирования.

Свойства последних во многом определяют выбор схем автоматизации, которые должны быть, по возможности, проще, экономичнее и надежны в работе.

В сравнении с промышленностью и энергетикой по развитию автоматизации одно из последних мест в настоящее время занимает ирригация.

В значительной мере это объясняется многообразием и сложностью явлений, связанных с движением воды в открытых каналах, а также с рассредоточением объектов регулирования на большой площади. (В качестве объекта регулирования на оросительных системах считаем комплекс гидротехнических сооружений с подводными и отводящими каналами).

Объекты регулирования, в свою очередь, характеризуются наличием нескольких регулируемых величин (уровни или расходы воды в каналах) связанных между собой, как правило, многозначными зависимостями. Наличие многих переменных в случае математического анализа работы объекта регулирования приводит к сложным и трудоемким расчетам не пригодным к практическому использованию. Влияние волновых процессов на работу отдельных звеньев оросительных систем позволяет отнести последние к системам с распределенными параметрами, где воздействие од-

ного звена на другое передается не мгновенно, а с некоторым запаздыванием во времени.

Анализ существующего состояния оросительных систем Средней Азии указывает на отсутствие автоматических регуляторов расходов воды в эксплуатации. Это объясняется неэкономичностью электрификации малых и средних сооружений для целей питания электрических автоматических регуляторов и недостаточной надежностью и точностью работы, имеющихся гидравлических автоматических регуляторов. Вопрос использования энергии потока для работы автоматических гидравлических регуляторов имеет важное значение при разработке схем автоматизации оросительных систем. В настоящее время в этом направлении ведутся работы по созданию более совершенных автоматических гидравлических регуляторов уровней и расходов воды. Однако, вопросы исследования свойств объектов регулирования, решение которых позволило бы подойти к оценке качества работы этих регуляторов, найти оптимальные режимы работы распределительных сооружений, при которых точность регулирования соответствовала бы заданной, а также подойти к оценке совместной работы регуляторов, связанных через объект регулирования, детально не рассматривались.

При автоматизации в смежных областях народного хозяйства получили развитие работы, которые ставили целью исследование систем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Так, А. А. Абдуллаевым в области нефтяной промышленности были исследованы вопросы автоматического регулирования групп компрессорных скважин, связанных общей питающей магистралью.

Однако, при анализе свойств объектов регулирования им не учитывались волновые процессы в силу незначительного их влияния на работу как отдельных, так и связанных в целые системы регуляторов.

В области регулирования паровых турбин детально исследованы вопросы устойчивости и качества работы регуляторов, поддерживающих давление в длинных трубопроводах.

Однако, системы регулирования подачи или давления газа или пара не учитывают особенности и явления, имеющие место в работе открытых каналов оросительных систем.

Цель реферируемой работы заключается в анализе свойств объектов регулирования оросительных систем и некоторых схем зависимого несвязанного автоматического регулирования, которые найдут применение на первом этапе автоматизации оросительных систем. Анализ процессов в объекте регулирования неразрывно связан с рассмотрением неуста-

новившегося движения воды в открытых каналах. Значительное количество литературы посвящено этому вопросу, однако, для получения решений уравнений движения используются в основном графо-аналитические методы, которые не позволяют оценить работу систем регулирования в общем случае.

В настоящей работе сделана попытка дать анализ свойств объектов регулирования на оросительных системах, выявить закономерности взаимовлияния нескольких регулируемых величин, а также определить наиболее выгодные режимы работы каналов, когда влияние регулируемых величин между собой сводится к минимуму.

Другая задача заключается в оценке возможных схем автоматизации участков оросительных систем с точки зрения простоты, надежности и качества регулирования.

## Г Л А В А I

### Экспериментальные и теоретические исследования объекта регулирования

Одна из основных задач при анализе объектов регулирования оросительных систем заключается в необходимости выделить те факторы, влияние которых на ход переходного процесса незначительно и которыми можно пренебречь при теоретических исследованиях объектов и систем автоматического регулирования расходов воды в каналах.

Как известно, уравнение неустановившегося движения воды в канале в общем виде не интегрируется без предварительных упрощений, связанных с пренебрежением ряда факторов.

Наиболее строгий и гибкий из всех основных методов расчета неустановившегося движения воды, описанных в современной литературе, — метод характеристик, не позволяет анализировать работу системы автоматического регулирования, ввиду трудоемкости расчетов даже для частных случаев, не говоря уже об анализе общего случая, без применения вычислительных машин.

Наблюдения за протеканием переходных процессов в каналах у вододелительных сооружений показали, что в случаях, когда каналы имеют значительную протяженность (рис. 1) волновые явления, при скачкообразном характере приложенных возмущающих воздействий к затворам сооружений, ясно выражены лишь в начале переходного процесса. Волны распространяются вдоль по каналам и, отражаясь от других сооружений, не возвращаются к месту приложения воздействия.

Когда участок канала ограничен близрасположенными сооружениями (рис. 2), волна, возникающая у одного сооружения, несколько раз проходит этот участок, отражаясь поочередно от граничных сооружений, пока не затухнет в результате наличия сил сопротивлений.

Таким образом, оказалось целесообразным создать соот-

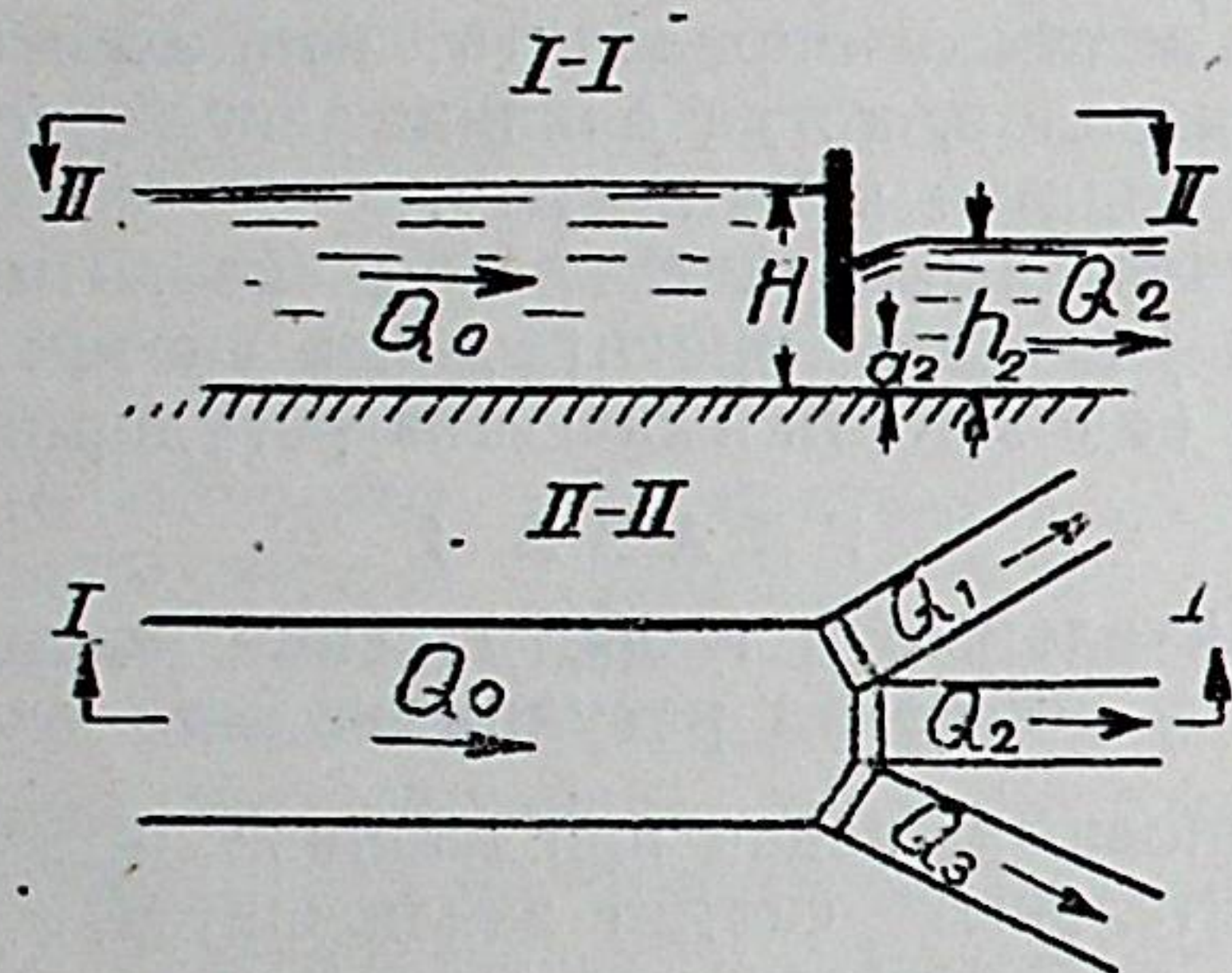


Рис. 1.

ветственно две модели объекта регулирования для теоретического исследования систем автоматического регулирования.

Для первой модели объекта регулирования переходные процессы описываются (в линейном приближении) сис-

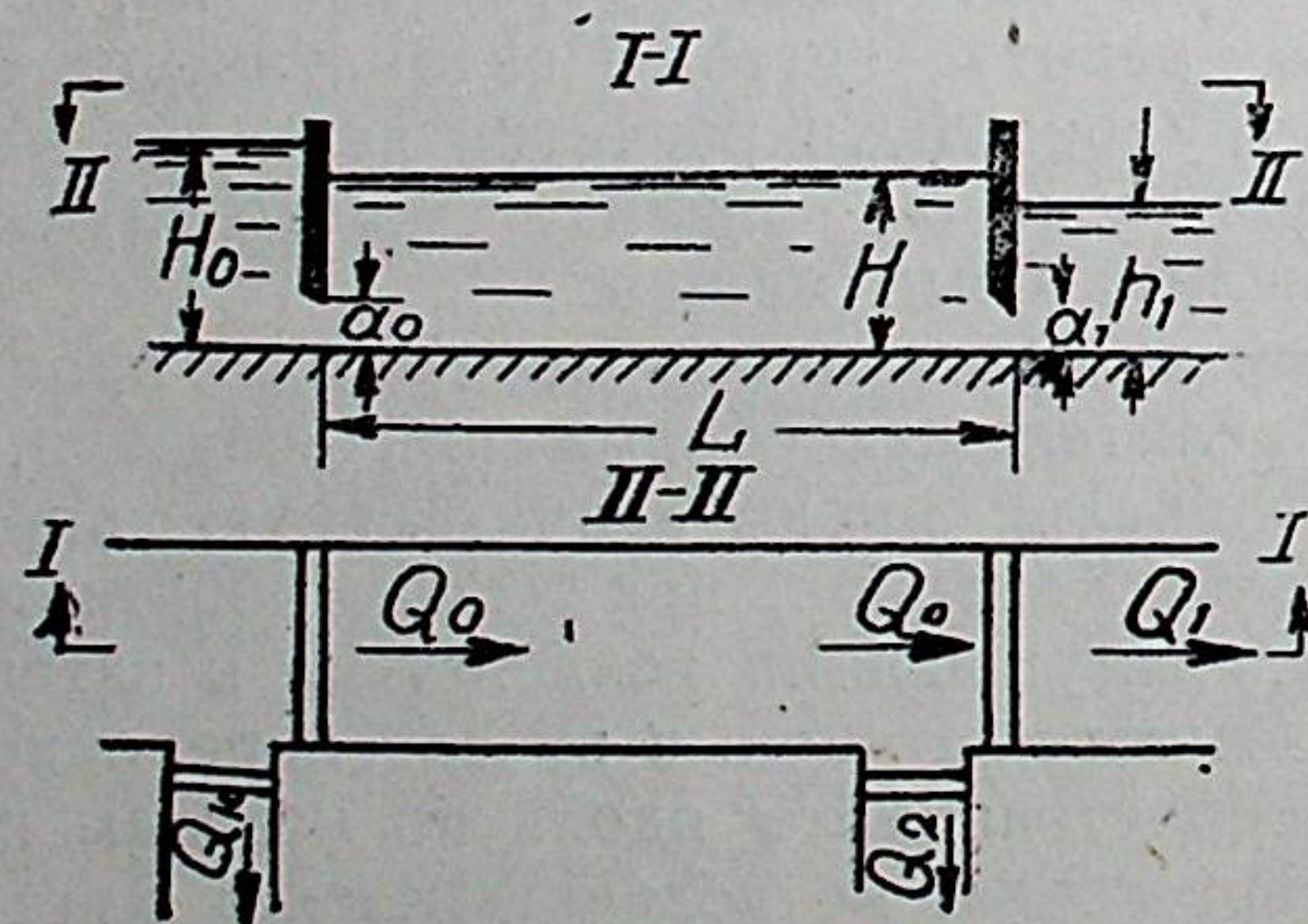


Рис. 2.

темой (при учете чистого времени запаздывания) обыкновенных дифференциальных уравнений с переменным во времени коэффициентами вида:

$$(T_0 p + 1) \zeta = \sum_{j=1}^n K_{j\zeta} \zeta_j + \sum_{j=1}^n K_{j\alpha} \alpha_j + K_{j\lambda} \lambda;$$

$$(T_j p + 1) \zeta_j = K_{j\zeta} \zeta + K_{j\alpha} \alpha_j; \quad j=1 \div n, \quad (1)$$

здесь  $\zeta$  — относительное отклонение глубины в верхнем бьефе вододельного сооружения,

$\alpha_j$ ;  $\zeta_j$  — относительные отклонения открытия затвора и глубины наполнения в  $j$  отводящем канале,

$\lambda$  — относительное отклонение расхода воды в подводящем канале.

$K_{j\zeta}$ ,  $K_{j\alpha}$ ,  $K_{j\lambda}$  — коэффициенты усиления,

$T_0$ ,  $T_j$  — постоянные времени,

$n$  — число отводящих каналов,

$u$  — число отводящих каналов со свободным сопряжением потока у сооружения.

Или описываются приближенным решением уравнений в частных производных с учетом сил сопротивлений.

Для второй модели в основу уравнений динамики объекта регулирования легли преобразованные уравнения медленно изменяющегося одномерного движения воды в каналах в условиях волн малой амплитуды при отсутствии сил сопротивлений. В этом случае требуется решение краевых задач с линейными граничными условиями.

Причем, эксперименты показывают, что теоретические кривые переходного процесса по характеру протекания последнего довольно хорошо согласуются с экспериментальными, хотя явление деформации волн в каналах при расчетах не учитывается. Однако, с точки зрения анализа систем автоматического регулирования, это вполне допустимо. Первая и вторая модели объекта регулирования позволяют проводить анализ работы системы автоматического регулирования с распределенными параметрами, поскольку учитывается эффект запаздывания распространения воздействий во времени в объекте регулирования, а отклонения переменных считаются достаточно малыми.

Анализ свойств объектов регулирования проводился как при возмущающих воздействиях, имеющих характер единичного скачка, так и при возмущениях, изменяющихся равномерно во времени (медленный подъем или опускание затворов на вододельных сооружениях).

Известные трудности представляет собой аналитическое определение коэффициентов дифференциальных уравнений. Поэтому в работе предложены графические зависимости, которые позволяют довольно просто находить численное значение коэффициентов дифференциальных уравнений объектов регулирования. То есть получены кривые  $\psi_1 =$

$$= \frac{\partial Q}{\partial H} \frac{1}{\beta b \sqrt{H}}; \psi_2 = \frac{\partial Q}{\partial a} \frac{1}{\beta b \sqrt{H}} \text{ и}$$

$$\psi_3 = \frac{\partial Q}{\partial h_0} \frac{1}{\beta b \sqrt{H}}$$

в зависимости от переменных  $\frac{a}{H}$  и  $\frac{h_0}{H}$  для различных режимов сопряжения потока в нижнем бьефе сооружения.

Здесь:  $H$ —глубина воды в верхнем бьефе перед затвором отводящего канала,

$a$ —величина открытия затвора,

$h_0$ —бытовая глубина воды в отводящем канале,

$\beta$ —коэффициент бокового сжатия потока при входе в отверстие под затвором,

$b$ —ширина отверстия,

$Q$ —расход, пропускаемый в отводящий канал.

Эти кривые практически позволили охватить все случаи сочетаний переменных  $H$ ,  $a$ ,  $h_0$ .

## Г Л А В А II

### Установившийся режим работы распределительного сооружения и взаимовлияние в нерегулируемой системе каналов

Расчеты установившегося режима работы распределительного сооружения, в принципе, возможно провести известными методами, однако, если учесть сложные аналитические зависимости и значительный объем вычислительной работы, становится понятным, что использование графических зависимостей позволяет намного упростить расчеты, которые необходимо проводить при проектировании систем автоматического регулирования.

Наибольший интерес приобретает рассмотрение следующих трех случаев:

1. Отводящие каналы вододелительного сооружения работают при равномерном движении воды. Известны их глубины наполнения  $h_1, h_2, \dots, h_n$ , расходы  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , глубина

в верхнем бьефе  $H$ , определяются необходимые открытия затворов  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .

2. Отводящие каналы вододелительного сооружения работают при неравномерном движении воды, причем условия подпора неизвестны, известны открытия затворов, глубины наполнения отводящих каналов, расход воды подводящего канала. Определяются глубина в верхнем бьефе и расходы в каждом из отводящих каналов.

3. Отводящие каналы вододелительного сооружения работают при равномерном движении воды. Известны открытия затворов, расход подводящего канала, определяется глубина наполнения каждого отводящего канала и глубина  $H$  в верхнем бьефе сооружения.

Все три задачи решаются с применением зависимостей

$$\psi = \frac{Q}{\beta b H \sqrt{H}}; G = \frac{Q}{\beta b} \text{ и } \frac{h_z}{H}, \text{ представленных кри-}$$

выми на графиках относительно переменных  $\frac{a}{H}$ ,  $\frac{h_0}{H}$ .

Это позволяет для различных сочетаний переменных  $H$ ,  $h_0$ ,  $a$  упростить расчеты, а также определять без проведения каких-либо предварительных вычислений режимы сопряжения потока в нижнем бьефе, а следовательно найти и вид уравнений объекта регулирования.

Исследование вопроса о влиянии нескольких регулируемых величин в объекте регулирования (без автоматических регуляторов) основывается на анализе уравнений динамики объекта, причем рассматриваются наряду с динамическим статическое влияние, т. е., когда  $t \rightarrow \infty$ , где  $t$ —время, отсчитываемое от начала переходного процесса.

Анализ влияния регулируемых величин в объекте регулирования был проведен для случаев, когда в подводящем канале распределительного сооружения отсутствует самовыравнивание по расходу, а отводящие каналы работают при равномерном движении воды, а также когда подводящий канал обладает частичным самовыравниванием по расходу. Рассмотрение последнего случая позволило выяснить взаимовлияние между регулируемыми величинами нескольких распределительных сооружений.

В первом случае получено выражение для отклонения уровня воды в верхнем бьефе распределительного сооружения в виде:

$$\zeta_{\infty} = \frac{\sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{\alpha j} \cdot \alpha_{j0} + \sum_{j=1}^{j=n} K_{jz} \alpha_{j0} + K_{\lambda} \lambda_0}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{zj}} \quad (2)$$

а для отводящего канала г:

$$\zeta_{r\infty} = K_{zr} \zeta_{\infty} + K_{\alpha r} \alpha_{r0}, \quad (3)$$

где:  $n$  — число отводящих каналов от распределительного сооружения,

$u-1$  — число отводящих каналов со свободным сопряжением потока в голове каждого из них.

Символ  $\infty$  показывает, что рассматривается изменение обобщенных координат системы  $\zeta_0$  времени при  $t \rightarrow \infty$ . Индекс 0 показывает, что изменение отклонений считается мгновенным в момент времени  $t=0$ . При анализе выражений (2) и (3) были введены понятия коэффициентов влияния  $D_{\alpha}$  и  $D_{\lambda}$  и коэффициентов взаимовлияния  $D_{\alpha r}$  и  $D_{\lambda r}$  для нерегулируемой системы каналов.

Если положить, что  $\lambda_0=0$ ;  $\alpha_{j0}$ , кроме  $\alpha_{u0}$ , то

$$D_{\alpha} = \frac{K_{uz} \cdot K_{\alpha u} + K_{uz}}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{zj}}$$

— коэффициент, учитывающий влияние изменения открытия затвора в голове отводящего канала на величину отклонения глубины воды в верхнем бьефе распределительного сооружения.

А коэффициент  $D_{\alpha r} = K_{zr} D_{\alpha}$  учитывает влияние изменения открытия затвора в голове отводящего канала „ $u$ “ на величину отклонения глубины воды в отводящем канале г.

Коэффициент влияния  $D_{\lambda}$  характеризует степень влияния отклонения расхода в подводящем канале на отклонение глубины в верхнем бьефе распределительного сооружения.

Коэффициент взаимовлияния  $D_{\lambda r}$  аналогичный  $D_{\alpha r}$  отражает влияние изменения расхода на отклонение глубины в отводящем канале г.

Анализ коэффициентов влияния и взаимовлияния пока-

зывает, что коэффициент  $D_{\alpha}$  в случае несвободного истечения из-под затвора всегда меньше по абсолютной величине коэффициента  $D_{\alpha}$  при свободном истечении (при прочих равных условиях). То есть, изменение открытия затвора  $\alpha_j$  тем слабее влияет на величину  $\zeta$ , чем меньше перепад между уровнями воды верхнего бьефа и отводящего канала; и тем сильнее, чем ближе сжатая глубина  $h_{c1}$  к глубине подтопления  $h_{z1}$ .

Кроме того, изменение открытия затвора  $\alpha_j$  тем сильнее влияет на величину отклонения уровня верхнего бьефа, чем

меньше отношение  $\frac{a_j}{H}$ . Исследуя взаимовлияние в режимах работы отводящих каналов, приходим к выводу, что отводящий канал тем сильнее реагирует на изменение режима работы другого отводящего канала, чем ближе глубина наполнения в нем к глубине верхнего бьефа  $H$ , или чем меньше перепад между уровнями воды.

Анализ выражения производной  $\frac{\partial Q_j}{\partial a}$  показывает, что чем больше расход, потребляемый отводящим каналом, тем больше коэффициент влияния  $D_{\alpha}$ .

Если предположить, что все отводящие каналы работают при одинаковых перепадах уровней и при одинаковых открытиях затворов, то коэффициент взаимовлияния  $D_{\alpha r}$  будет тем больше, чем больше расход того канала, у которого меняется открытие затвора или чем больше ширина отверстия, перекрываемая затвором.

Анализируя изменение коэффициента влияния при изменении отношения  $\frac{a}{H}$ , приходим к выводу, что чем меньше

отношение  $\frac{a}{H}$  для затворов отводящего канала, тем больше коэффициент влияния  $D_{\alpha}$ .

Коэффициенты  $D_{\alpha}$  и  $D_{\lambda}$  имеют в знаменателе выражение:

$$\delta = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q_j}{\partial H} \left[ 1 + \sum_{j=u}^{j=n} \frac{\frac{\partial Q_j}{\partial h}}{\sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q_j}{\partial H}} \cdot \frac{\frac{\partial Q_j}{\partial H}}{\frac{\partial Q_{kj}}{\partial h} + \frac{\partial Q_j}{\partial h}} \right]$$

которое характеризует способность нерегулируемой системы к самовыравниванию. По аналогии из области регулирования компрессорной подачи воздуха, величина  $\delta$  названа приведенным коэффициентом самовыравнивания системы.

Если  $u-1=0$ , получим  $\delta < \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q}{\partial H}$ , если  $n=u-1$ , то приведенный коэффициент определяется выражением

$$\delta = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q_j}{\partial H},$$

что позволяет сделать следующий вывод: чем больше отводящих каналов имеют на головных участках режим свободного сопряжения потока и чем больше их расходы, тем больше величина  $\delta$  и, следовательно, меньше величина коэффициентов влияния.

На основании изложенных особенностей взаимовлияния в режимах работы каналов, связанных общим верхним бьефом, в случае отсутствия самовыравнивания у подводящего канала по расходу, в работе указаны мероприятия по уменьшению эффекта взаимовлияния регулируемых величин без применения автоматических регуляторов уровней и расходов воды. Для уменьшения влияния между регулируемыми величинами в объекте регулирования необходимо учитывать следующие соображения:

1. Отводящие каналы при частых изменениях расхода воды в них, а также каналы, к которым не предъявляются повышенные требования поддержания заданного расхода воды, следует проектировать с минимально возможными перепадами уровней на головных сооружениях при максимально возможных открытиях затворов.

Отводящие каналы, где режимы работы меняются редко и где требуется соблюдать с особой тщательностью постоянство заданного расхода, следует проектировать с максимально возможными перепадами уровней при минимальных открытиях затворов.

2. Распределение расходов воды между отводящими каналами вододельительного сооружения требуется подбирать так, чтобы расходы отводящих каналов, где часто приходится менять режимы работы, были небольшими по сравнению с расходами, забираемыми в другие отводящие каналы.

Если подводящий канал обладает частичным самовыравниванием по расходу (допустим, в зоне распространения неравномерного движения расположено перегораживающее сооружение), то в знаменателе коэффициента влияния  $D_a$

появляется слагаемое  $-\frac{\partial Q_0}{\partial H}$ , которое показывает, что чем меньше перепад уровней воды у перегораживающего сооружения, тем меньше величина коэффициента влияния  $D_a$ , следовательно, для того, чтобы получить как можно больше самовыравнивание по расходу у подводящего канала и меньше величину коэффициентов влияния и взаимовлияния, необходимо, чтобы перепад уровней воды у перегораживающего сооружения был, по возможности, наименьшим при максимально возможной величине отношения  $\frac{a_0}{H_0}$ .

Здесь  $a_0$  — открытие затвора перегораживающего сооружения,

$H_0$  — глубина воды в верхнем бьефе перегораживающего сооружения.

Коэффициент динамического влияния в любой момент времени определяется формулой

$$R_a = \frac{N_2}{(M_2 + \gamma)\beta - (M_2 - \gamma)} \left[ 1 - \left( \frac{M_2 - \gamma}{M_2 + \gamma} \right)^{m_1} \frac{1}{\beta^{m_1}} \right] - \frac{N_2 \beta}{(M_2 + \gamma)\beta - (M_2 - \gamma)} \left[ 1 - \left( \frac{M_2 - \gamma}{M_2 + \gamma} \right)^{m_2} \frac{1}{\beta^{m_2}} \right],$$

причем

$$\left( \frac{M_2 - \gamma}{M_2 + \gamma} \right) \frac{1}{\beta} < 1.$$

Коэффициент влияния  $D_a$  выражается зависимостью

$$D_a = \frac{(1 - \beta)N_2}{(M_2 + \gamma)\beta - (M_2 - \gamma)}.$$

С другой стороны, при  $t \rightarrow \infty$  имеем  $m_1 \rightarrow \infty$  и  $m_2 \rightarrow \infty$ , следовательно, при конечной величине  $t$ :  $|R_a| \ll |D_a|$  или коэффициент влияния по абсолютной величине всегда больше коэффициента динамического влияния.

**Уравнения процесса автоматического регулирования уровней воды в каналах, связанных общим верхним бьефом**

Выбор схем автоматического регулирования уровней воды в каналах у распределительного сооружения может в некоторой степени базироваться на показателях эффекта взаимовлияния регулируемой системы каналов, а также на требованиях предъявляемых со стороны эксплуатации каналов.

В работе рассматривается ряд схем автоматизации одиночных и связанных вододелительных узлов, с помощью которых можно осуществить:

- а) поддержание в каналах заданной величины расхода воды,
- б) поддержание уровней воды у сооружения на заданных отметках,
- в) пропорциональное деление расходов воды между отдельными каналами у вододелительного сооружения,
- г) подачу требуемого количества воды потребителям без ограничения в определенных пределах (система без сбросов излишней воды).

К регуляторам предъявляются требования использования энергии потока воды, а также работы на самых различных по величине перепадах. Последнее предопределило выбор регулятора прямого действия при анализе систем автоматического регулирования.

При выводе уравнения регулятора не учитываются массы движущихся частей. Чувствительный элемент регулятора помещен в камеру, связанную с регулируемым бьефом, чем и объясняется работоспособность регулятора при любой величине перепада уровней воды.

Коэффициент усиления регулятора может изменяться в широких пределах.

Уравнение регулятора для уровня воды отводящего канала имеет вид:

$$(T_{kp} + 1)z_j = K_p z_j, \quad (4)$$

где  $T_k$  — постоянная времени камеры поплавка,  
 $K_p$  — коэффициент усиления регулятора.

Уравнение процесса регулирования для  $n$  регулируемых отводящих каналов вододелительного сооружения, разрешенное относительно  $k$ , имеет вид:

$$\left\{ T_{0p} + 1 - \sum_{j=u}^{j=n} \left[ \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} + \left( \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} + K_{jz} \right) \frac{K_{zj} \cdot K_{pj}}{(T_{jp} + 1)(T_{kj} + 1) - K_{zj} \cdot K_{pj}} - \sum_{j=1}^{j=u-1} \frac{K_{jz} \cdot K_{zj} \cdot K_{pj}}{(T_{jp} + 1)(T_{kj} + 1) - K_{zj} \cdot K_{pj}} \right] \right\} z = K_{\lambda} \lambda, \quad (5)$$

Уравнение процесса регулирования для системы содержащей  $k$  регулируемых и  $n-k$  нерегулируемых отводящих каналов относительно координаты  $z$  будет

$$\left\{ T_{0p} + 1 - \sum_{j=q+1}^{j=k} \left[ \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} + \left( \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} + K_{jz} \right) \frac{K_{zj} \cdot K_{pj}}{(T_{jp} + 1)(T_{kj} + 1) - K_{zj} \cdot K_{pj}} \right] - \sum_{j=1}^{j=q} \frac{K_{jz} \cdot K_{zj} \cdot K_{pj}}{(T_{jp} + 1)(T_{kj} + 1) - K_{zj} \cdot K_{pj}} - \sum_{j=u+k-p}^{j=u} \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} \right\} z = \sum_{j=u+k-q}^{j=n} \frac{K_{jz} \cdot K_{zj}}{T_{jp} + 1} z_j + \sum_{j=k+1}^{j=n} K_{jz} z_j + K_{\lambda} \lambda, \quad (6)$$

Здесь  $q$  — число регуляторов, установленных на отводящих каналах, которые имеют свободное сопряжение потока у затвора на головном участке.

Уравнение системы автоматического регулирования, снабженной регулятором уровня воды в верхнем бьефе распределительного сооружения, имеет следующий вид:



$$\left[ \begin{array}{l} T_0 - p + 1 \sum_{j=u}^{j=n} \frac{K_{j\zeta} \cdot K_{aj}}{T_{jp} + 1} - \frac{K_{u\zeta} \cdot K_{au} \cdot K_p}{(T_{up} + 1)(T_{kp} + 1)} \\ \frac{K_{u\alpha} \cdot K_p}{T_{kp} + 1} \end{array} \right] \zeta = \sum_{j=u-1}^{j=n} \frac{K_{j\zeta} \cdot K_{aj}}{T_{jp} + 1} \alpha_j + \sum_{j=2}^{j=n} K_{j\alpha} \cdot \alpha_j + K_\lambda \lambda. \quad (7)$$

Если участок подводящего канала ограничен выше распределительного сооружения перегораживающим сооружением и подводящий канал обладает частичным самовыравниванием по расходу, то уравнение процесса автоматического регулирования, когда на границах подводящего канала установлены регуляторы уровня воды в нижнем бьефе, принимает вид:

$$Z_2 = \frac{N_2(p) + R_2}{(M_2 + \gamma)\beta} \left\{ \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[ \frac{M_2 - \gamma}{(M_2 + \gamma)\beta} \right]^m \exp[-(m+1)(\tau_2 + \tau_1)p] - \beta \sum_{m_1=0}^{m_1+\infty} \left[ \frac{M_2 - \gamma}{(M_2 + \gamma)\beta} \right]^{m_1} \exp[-m_1(\tau_2 + \tau_1)p] \right\} Z_{22}, \quad (8)$$

где

$$Z_2 \rightarrow \zeta_2; \quad Z_{22} \rightarrow \zeta_{22};$$

$\zeta_2$  — относительное отклонение глубины воды в верхнем бьефе нижележащего распределительного (или перегораживающего) сооружения,

$\zeta_{22}$  — относительное отклонение глубины воды в нижнем бьефе этого же сооружения,

$\tau_1, \tau_2$  — время пробегания на соответственно прямой и обратной волны,

$N_2(p), M_2, \beta, \gamma, R$  — коэффициенты, характеризующие режим работы объекта регулирования.

#### Г Л А В А IV

### Взаимовлияние регулируемых каналов

Поскольку одним из основных показателей процесса регулирования уровней или расходов воды у распределительного сооружения является величина статической ошибки,

то значительный интерес представляет анализ статического взаимовлияния в регулируемой системе каналов.

В случае, когда регулируется все отводящие каналы, коэффициент влияния  $A_\lambda$  при изменении подаваемого расхода воды в верхнем бьефе сооружения принимает вид:

$$A_\lambda = \frac{K_\lambda}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} \left[ K_{j\zeta} \cdot K_{\zeta j} + (K_{j\zeta} \cdot K_{aj} + K_{j\alpha}) \frac{K_{\zeta j} \cdot K_{pj}}{1 - K_{aj} \cdot K_{pj}} \right]} \cdot \frac{K_\lambda}{\sum_{j=1}^{j=u-1} \frac{K_{j\alpha} \cdot K_{\zeta j} \cdot K_{pj}}{1 - K_{aj} \cdot K_{pj}}}$$

Коэффициент взаимовлияния  $A_{\lambda r}$  определяется выражением

$$A_{\lambda r} = \frac{K_{\zeta r}}{1 - K_{\lambda r} \cdot K_{pr}} A_\lambda$$

Если  $K_p \rightarrow \infty$ , то величина коэффициента  $A_\lambda \rightarrow \infty$ , следовательно, наличие регуляторов на всех отводящих каналах увеличивает теоретически беспредельно отклонение уровня в верхнем бьефе сооружения, если величина  $\lambda$  не будет скомпенсирована за счет статических ошибок регуляторов.

Запас над нормальным подпертым уровнем воды у сооружений до верха стенок невелик (обычно 0,20—0,30 м для средних сооружений), поэтому ясно, что система регулирования в случае отсутствия самовыравнивания по расходу у подводящего канала будет практически неустойчивой даже в статическом смысле.

В случае, если один или несколько отводящих каналов остаются нерегулируемыми, то коэффициент влияния имеет вид:

$$A_\lambda = \frac{K_\lambda}{\sum_{j=1}^{j=k} \left[ K_{j\zeta} \cdot K_{\zeta j} + (K_{j\zeta} \cdot K_{aj} + K_{j\alpha}) \frac{K_{\zeta j} \cdot K_{pj}}{1 - K_{aj} \cdot K_{pj}} \right]} \cdot \sum_{j=k+1}^{j=n} K_{j\zeta} \cdot K_{\zeta j} \quad (10)$$

здесь приятно, что все каналы работают при несвободном

176665

истечении воды из-под затворов и на  $K$ -отводящих каналах установлены регуляторы.

Знаменатель выражения  $A_\lambda$  всегда больше нуля независимо от величины  $K_p$ , поэтому величина  $A_\lambda$  всегда конечна.

Коэффициент взаимовлияния  $A_{\lambda r}$  для нерегулируемого канала определяется выражением

$$A_{\lambda r} = K_{zr} A_\lambda \quad (11)$$

а для регулируемого

$$A_{\lambda r} = \frac{K_{zr}}{1 - K_{ar} \cdot K_{pr}} A_\lambda \quad (12)$$

Сравнивая два последних выражения, получаем, что отклонение уровня в регулируемом отводящем канале меньше в  $(1 - K_{ar} \cdot K_{pr})$  раз, чем в нерегулируемом при прочих равных условиях. Нерегулируемые каналы следует выбирать, по возможности, со свободным сопряжением потока, при этом коэффициент влияния  $A_\lambda$  будет минимальным по величине.

Отклонение уровня воды верхнего бьефа в рассмотренных схемах регулирования определяется степенью самовыравнивания системы. В некоторых случаях самовыравнивание системы не позволяет получить отклонение уровня воды верхнего бьефа в требуемых пределах, в связи с чем возникает необходимость в регулировании положения уровня верхнего бьефа, когда коэффициент влияния определяется выражением

$$A_\lambda = \frac{K_\lambda}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{zj} - (K_{uz} \cdot K_{au} + K_{ua}) K_p} \quad (13)$$

(регулятор установлен на отводящем канале  $u$ ).

Если регулятор установлен на канале со свободным сопряжением потока, то

$$A_\lambda = \frac{K_\lambda}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{zj} - K_{ua} \cdot K_p} \quad (14)$$

Знаменатель этих выражений может быть, в зависимости от выбора  $K_p$ , получен достаточно большим по абсолютной величине, а, следовательно, коэффициент  $A_\lambda$  может быть как угодно мал.

Коэффициент взаимовлияния имеет вид

$$A_{\lambda r} = \frac{(K_{zr} + K_{ar} \cdot K_p) K_\lambda}{1 - \sum_{j=u}^{j=n} K_{jz} \cdot K_{zj} - (K_{rz} \cdot K_{ar} + K_{ra}) K_p}$$

т. е. отклонение уровня воды в отводящем канале, где установлен регулятор будет в  $(K_{zr} + K_{ar} \cdot K_p)$ , раз больше отклонения уровня воды верхнего бьефа.

Регулятор в этой схеме лучше устанавливать на отводе со свободным сопряжением потока.

Значительный интерес представляет система регулирования расходов воды в каналах, построенная таким образом, что потребители получают такое количество воды, какое им требуется, причем холостой сброс отсутствует.

Такая система наиболее вероятна, если каналы характеризуются малыми уклонами, а участки каналов между ограничивающими их сооружениями обладают в некоторой степени самовыравниванием по расходу. Вся система регулирования расходов воды может быть представлена рядом участков каналов, на границах которых установлены регуляторы уровня воды нижнего бьефа, связанных между собой последовательно и параллельно. Автоматические регуляторы в такой системе взаимодействуют между собой только через объект регулирования.

Распределенное расположение регуляторов, связанных между собой объектом регулирования, при анализе работы системы требует учета времени запаздывания, которое определяется расстоянием между регуляторами и скоростью распространения волны (расстояние между регуляторами может быть от нескольких десятков метров до нескольких километров, а скорость распространения волны колеблется обычно в пределах 1—3 м/сек).

Анализ выражения величины статического отклонения уровня воды на участке канала между двумя регулирующими сооружениями показывает, что всегда можно подобрать величины коэффициентов усиления  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$  регуляторов, установленных на границах этого участка так, что откло-

нение уровня будет находиться в допустимых пределах.

Анализ устойчивости согласно критерию, полученному А. А. Соколовым для одного вида систем с распределенными параметрами, позволяет сделать заключение, что при условии

$$|a| > 1; |b| < |ac|;$$

$$|a| < 1; |b| > |ac|,$$

система устойчива при любых соотношениях параметров, здесь

$$a = \frac{M_1 M_2 + (M_1 - M_2)\gamma - \gamma^2}{M_1 M_2 + (M_2 - M_1)\gamma - \gamma^2};$$

$$b = \frac{N_1}{M_1 + \gamma} K_{p1} + 1;$$

$$c = \frac{N_1}{M_1 - \gamma} K_{p1} + 1;$$

где  $M_1, N_1, M_2$  — коэффициенты, определяемые из граничных условий;  $\gamma$  — коэффициент, определяемый отношением скорости распространения волны к скорости течения.

Кроме того, условие:

$$\left| \frac{b + ca^2}{a(b + c)} \right| < 1$$

обычно не выполняется, следовательно, систему регулирования участка канала можно считать устойчивой при коэффициентах  $K_{p1}, K_{p2}$ , достаточно больших по абсолютной величине.

На величину статических отклонений уровня воды в каналах такой системы требования эксплуатации накладывают определенные ограничения, что необходимо учитывать при проектировании системы в выборе коэффициентов  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$ .

## Г Л А В А V

### Эксперименты и наблюдения над работой неавтоматизированных и автоматизированных распределительных сооружений

Исследование работы распределительных сооружений при отсутствии автоматических регуляторов проводилось на действующих распределительных сооружениях Атбашинского магистрального канала Фрунзенской области, а также в

лаборатории гидродинамики Киргизского государственного университета.

Работа автоматизированных одиночного и нескольких распределительных сооружений исследовалась на экспериментальной гидротехнической площадке АН Кирг. ССР.

Распределительные сооружения при исследовании свойств объектов регулирования имели от 2 до 4 отводящих каналов с расходами в подводящих каналах  $0,2 - 1,0 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Автоматизированное распределительное сооружение с двумя отводящими каналами работало при расходах подводящего канала  $0,15 - 0,25 \text{ м}^3/\text{сек}$  и при глубине наполнения  $0,6 - 0,8 \text{ м}$ .

Размеры подводящего и одного из отводящих каналов следующие: ширина по дну  $b = 0,5 \text{ м}$ , строительные глубины  $h = 0,8 \text{ м}$ , откосы  $m = 1,0$ . Ширина по дну у второго канала составляла  $0,4 \text{ м}$  и при откосах  $m = 0$ .

В нижнем бьефе распределительного сооружения имелась возможность создать любой подпор.

Модель участка оросительной системы состояла из двух распределительных сооружений. Уклон связывающего канал изменялся в пределах от  $0,3$  до  $0,00$ . Площади поперечного сечения составляли  $0,25 \times 0,22 \text{ м}^2$ .

Распределительное сооружение оборудовалось регуляторами прямого и непрямого действия. Запись переходных процессов производилась на картограммы самописцами с приводом от синхронных моторов СД-2 (скорость вращения  $2 \text{ об/мин}$ .)

Эксперименты проводились в следующем порядке:

1. Распределительное сооружение не автоматизировано. Возмущался режим работы одного отводящего канала путем изменения открытия затвора, наблюдалось нарушение режима работы верхнего бьефа при длинном и коротком участках подводящего канала (в смысле наличия и отсутствия отраженных волн в подводящем канале), наблюдалось также нарушение режима работы другого отводящего канала.

2. Установлены автоматические регуляторы прямого действия для уровня воды на каждом из отводящих каналов. Возмущался режим работы верхнего бьефа и одного из отводящих каналов, записывались кривые переходных процессов в отводящих каналах и верхнем бьефе.

3. Установлен автоматический регулятор уровня воды одного отводящего канала. Возмущался режим работы верхнего бьефа или нерегулируемого отводящего канала, записывались переходные процессы в регулируемом канале и верхнем бьефе.

4. Установлен автоматический регулятор уровня верхне-

го бьефа. Возмущался режим работы верхнего бьефа, наблюдались изменения режимов работы отводящих каналов и верхнего бьефа.

5. Установлены автоматические регуляторы уровней воды отводящих каналов на двух распределительных сооружениях, связывающий канал обладает частичным самовыравниванием по расходу. Возмущался режим работы отводящего канала нижележащего сооружения, записывались режимы работы канала между распределительными сооружениями и других отводящих каналов.

6. Установлен автоматический регулятор расхода непрямого действия, записывался режим работы верхнего и промежуточного бьефов.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают расчетные данные, приведенные в предыдущих главах с качественной и количественной стороны.

\* \* \*

В приложении к диссертации приводится расчет двух типов регуляторов непрямого действия для целей практического использования при осуществлении схем автоматизации участков оросительных систем, описанных выше.

На базе регуляторов непрямого действия приводится построение системы пропорционального регулирования расходов воды у вододелительных сооружений.

В расчетах регуляторов непрямого действия встречается задача определения потерь давления на плоскость при движении потока воды.

Решение ее сопряжено с определенными трудностями, однако, результаты работы Н. Е. Жуковского о концентрировании струи жидкости, позволили получить формулу для расчета потерь давления.

В целях практического применения ее составлен ряд графиков, которые позволяют по известной величине скорости потока перед преградой и углу наклона плоскости преграды определить величину потерь давления.

Схема пропорционального регулирования рассматривается в вариантах: зависимого несвязанного регулирования и связанного регулирования.

Поскольку одним из основных показателей качества процесса регулирования является статическая точность, то сравнение этих вариантов проводится, исходя из величины минимальной статической ошибки.

### З а к л ю ч е н и е

В диссертации показано, что динамические характеристики объектов, характеризующихся наличием нескольких ре-

гулируемых величин, могут быть описаны уравнениями в обыкновенных производных с переменными коэффициентами с учетом уравнения звена чистого запаздывания для длинных бьефов. В случае коротких бьефов необходимо рассматривать систему с распределенными параметрами. Наличие волновых процессов придает объекту регулирования существенно новые свойства, которые не могут в достаточной степени учитываться обыкновенными дифференциальными уравнениями.

2. Исследование свойств объекта регулирования показывает, что взаимосвязь между регулируемыми величинами может быть выражена определенными коэффициентами, анализ которых позволяет найти оптимальные соотношения между параметрами, характеризующими работу объекта регулирования, когда отклонения регулируемых величин, при внесенных возмущениях будут наименьшими.

3. Исследования статических характеристик объектов регулирования показали, что имеется возможность получить универсальные графические зависимости, которые позволяют оценить работу объекта регулирования в статическом режиме, несмотря на большое число переменных величин. Дана методика и доведены до инженерной стадии расчеты по определению коэффициентов уравнений объекта регулирования и коэффициентов влияния регулируемых величин. Графические зависимости позволяют упростить и сократить инженерные расчеты по определению статических режимов работы объектов регулирования.

4. Показано, каким образом можно добиться уменьшения взаимовлияния между регулируемыми величинами в системах регулирования расходов воды.

5. Проведен анализ нескольких схемных решений в случае отсутствия самовыравнивания по расходу у каналов при регулировании расходов воды. В результате получены показатели, которые позволяют практически оценить схему регулирования и выбрать тип и количество регуляторов.

6. Предложена методика расчета нескольких типов регуляторов прямого и непрямого действия для поддержания уровней на заданных отметках, заданных расходов воды и пропорционального деления расходов на распределительных сооружениях и отдельных водовыпусках.

\* \* \*

По материалам диссертации автором опубликованы следующие статьи:

1. О коэффициентах дифференциальных уравнений не-

которых объектов регулирования на каналах. Труды ИЭВХ:  
АН Кирг. ССР, выпуск 6 (IX), 1959 г.

2. О переходных процессах некоторых объектов регулиро-  
вания на водотоках. Известия АН Кирг. ССР, серия есте-  
ственн. и технич. наук том 1, выпуск 4, 1959 г.

3. Автоматическое регулирование расходов воды в ка-  
налах, питающихся из общего верхнего бьефа. Известия  
АН Кирг. ССР, серия естественн. и техн. наук, т. 1, выпуск 4,  
1959 г.

4. Автоматические регуляторы расхода и уровней воды  
в каналах оросительных систем, использующие энергию по-  
тока воды.

Бюллетень ГНТК Совета Министров Кирг. ССР 10—11  
(22—23). 1959.