

6
А 40

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

На правах рукописи

Э. Э. Маковский

КАСКАДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ
НА ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

(Специальность 254 — Автоматическое управление
и регулирование)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора
технических наук

Ташкент 1971

119

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Э.Э.Маковский

КАСКАДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ
НА ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

(05.254. Автоматическое управление и
регулирование)

А в т о р е ф е р а т д и с с е р т а ц и и
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ташкент 1971

ваемого участка необходимыми нормами воды. Решение ее может быть осуществлено на базе использования принципа каскадного регулирования при построении автоматизированных оросительных систем. Системы каскадного регулирования расходов воды позволяют связать потребителя с головным сооружением, создать резервные объемы воды в каналах и обеспечить полное или частичное суточное регулирование стока воды без холостых сбросов ее. Для этих систем характерна возможность накопления резервных объемов в период минимума водопотребления и использования их в часы максимальной водоподдачи, что позволяет повысить к.п.д. оросительной системы и снизить до минимума непроизводительные потери воды. При построении систем каскадного регулирования характерно расчленение каналов на участки автоматизированными перегораживающими сооружениями с регулированием уровней в их бьефах (рис.1).

Целью настоящей работы является формирование теории переходных процессов при каскадном регулировании расходов воды, разработка методов и средств построения систем каскадного регулирования с использованием непосредственно энергии потоков воды в каналах для питания гидравлических регуляторов стабилизации уровней воды. При этом характерным является одновременное решение задач механизации и автоматизации гидротехнических сооружений.

Вопросы построения систем каскадного регулирования и взаимосвязанной работы автоматизированных гидротехнических сооружений практически не изучены, отсутствуют методы и нормы проектирования. На эту тему имеется сравнительно небольшое число работ, появившихся в виде рекламных каталогов за рубе-

жом, в основном, для частных случаев построения систем каскадного регулирования с аппаратурой французской фирмы Нейрпик и Согреах, которая имеет ограниченные возможности в смысле выполнения операций суточного регулирования расходов воды. Почти все эти работы посвящены статическим расчетам аппаратуры гидравлической автоматики и неравномерному движению воды в каналах без учета динамики процессов регулирования расходов воды. В последнее время за рубежом появились попытки использования методов численного интегрирования уровней неустановившегося движения для анализа устойчивости переходных процессов, однако, эти результаты носят частный конкретный характер для систем с так называемым "двойным регулированием уровней воды". Такое положение объясняется исключительной ограниченностью данных о динамических свойствах объектов регулирования, анализ которых связан с решением уравнений неустановившегося движения воды в открытых руслах или каналах. В настоящее время известно большое число методов приближенного интегрирования уравнений Сен-Венана, которые с теми или иными допущениями удовлетворяют конкретным задачам инженерной практики, однако, каждому из них свойственны те или иные недостатки, а общим является чрезвычайная сложность и отсутствие решения в общем виде. Применение электронных вычислительных машин (ЭВМ) открыло большие перспективы для гидравлики в части расчета неустановившегося движения воды при расчете волн попусков и паводков в естественных руслах. Для задач речной гидрологии в настоящее время разработаны численные методы расчета на ЭВМ неустановившегося движения с относительно небольшими затратами машинного времени, однако для задач регулирования расходов в сложной си-

стеме взаимосвязанных каналов и автоматизированных сооружений возникают определенные трудности при использовании численных методов.

Одна из важнейших проблем синтеза системы автоматического управления может быть достаточно эффективно разработана только после анализа динамических свойств объекта регулирования, типовым элементом которого можно считать участок канала, ограниченный вододелительными сооружениями.

Задачи расчленения каналов на участки перегораживающими сооружениями, выбора резервных емкостей, расположения водовыпусков могут быть правильно решены при учете динамики процессов и технических характеристик аппаратуры автоматики. Оборудование регулирующей аппаратуры существующих систем, как правило, требует строительства дополнительных перегораживающих сооружений и приводит к вариантам автоматизации, далеким от оптимальных.

Системы каскадного регулирования при соответствующем выборе регулирующей аппаратуры и ее быстродействия позволяют проводить суточное перерегулирование расходов в резервных емкостях каналов и водоемов, что значительно увеличивает коэффициент использования оросительной воды за счет уменьшения холостых сбросов, повышение стабильности поступления расходов воды потребителям, сглаживание неравномерных графиков подачи её в магистральные, межхозяйственные каналы и на внутрихозяйственной сети. Кроме экономии и рационального использования воды за счет стабильности стока её достигается повышение производительности труда и лучшее использование техники при по-

Специфика методов анализа устойчивости и качества процессов в теории автоматического регулирования и управления позволила обратить внимание на группу методов, рассматривающих неустановившееся движение воды в условиях волн малой амплитуды.

Теория волн малой амплитуды предполагает, что все изменения гидравлических элементов, обусловленные волновым движением, суть величины малые, так что квадратами этих величин, а равно и их произведениями, можно пренебречь. Рассматриваемый некоторый начальный установившийся режим представляет равномерное движение воды в канале.

При этом уравнении Сен-Венана имеют следующий вид

$$\frac{\partial \Delta h}{\partial s} + \frac{1}{g} \frac{\partial \Delta v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial \Delta v}{\partial s} + 2J \frac{\Delta v}{v} + J \left(\frac{2B}{\omega} - \frac{x}{h} \right) \Delta h = 0,$$

$$B \frac{\partial \Delta h}{\partial t} + \omega \frac{\partial \Delta v}{\partial s} + Bv \frac{\partial \Delta h}{\partial s} = 0,$$

(I)

где Δh — приращение глубины наполнения, Δv — приращение скорости течения, s — расстояние, t — время, B — ширина потока поверху, ω — площадь живого сечения, x — гидравлический показатель русла, J — уклон канала.

Полученные Мелещенко К.Т.^{*)} периодические решения уравнений (I) не могут удовлетворить поставленным задачам анализа и синтеза систем автоматического регулирования расходов воды, так как не описывают переходных процессов в объектах

^{*)} Известия Научно-исследовательского института гидротехники, том 28, 1940.

регулирования, а представляют собой частные решения, когда возмущающие или управляющие воздействия характеризуются периодическими функциями. В связи с этим возникла задача разработки метода расчета неустановившегося движения воды с привлечением теории волн малой амплитуды для получения решений более общего вида применительно к изменению расхода гидротехнических сооружений по любому выбранному закону, что равносильно возмущениям или управляющим воздействиям, реально имеющим место на ирригационных системах.

Результатам решения этой задачи посвящаются первые три главы настоящей работы:

I. Объекты регулирования ирригационных систем.

II. Статические характеристики объектов регулирования ирригационных систем.

III. Динамика процессов в объектах регулирования ирригационных систем.

Исследованию динамики процессов в системах регулирования расходов воды предшествует подробный анализ свойств неустановившегося движения воды на участке канала. Рассматриваются прямые, обратные, отраженные и неотраженные волны. Анализ динамики распространения указанных волн с использованием частотных методов и интегральных оценок качества переходных процессов позволяет подойти к разработке метода преобразования уравнений, характеризующихся дробно-иррациональными передаточными функциями.

Предложенный метод преобразования уравнений (I) позволяет аналитически выразить все основные свойства распределенных

процессов в открытых каналах, такие, как передача волновых расходов, изменение инерционности процессов и затухание волн вдоль канала, наличие чистого запаздывания и т.д.

Совершенствование управления оросительными системами зависит в значительной степени от решения задач одновременного проектирования аппаратуры автоматики и комплекса гидротехнических сооружений с увязкой теории установившихся и переходных режимов работы каналов и сооружений оросительных систем.

Эту задачу эффективно решать на базе использования методов современного математического анализа, что позволяет согласовать вопросы анализа неустановившегося движения воды в каналах с задачами авторегулирования, где господствует частотный метод, опирающийся на теорию аналитических функций, применение преобразований Фурье, Лапласа и др. методов. Примером решения такого класса смешанных задач может служить разработка принципов автоматизации в различных других отраслях народного хозяйства, например, в химическом производстве^{*)}.

Наиболее общий случай взаимосвязанной работы каналов представляется в системах каскадного регулирования, когда осуществлена прямая и обратная связь по расходу между участками каналов, разделенных автоматизированными гидротехническими сооружениями.

Прямая связь по расходу воды практически имеется на всех системах. Организация обратной связи по расходу зависит в основном от рельефа местности (уклонов каналов), расстояния меж-

*) Девятков Б.Н. Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления, Изв.Сиб.отд.АН СССР, Новосибирск, 1964.

ду перегораживающими сооружениями. На каналах с малыми уклонами обратная связь может быть осуществлена через подпор воды.

Наличие каналов с большими уклонами и сопрягающими сооружениями препятствует созданию связи через подпор, поэтому для таких систем представляют интерес электрические каналы обратной связи. Однако, электрификация отдельных участков системы не всегда может быть эффективна по соображениям экономики, поэтому значительный интерес представляет использование в качестве каналов обратной связи трубопроводов малого сечения, заполненных жидкостью, воздухом или смесью жидкость-воздух. Применение трубопроводов малого сечения в качестве каналов обратной связи открыло большие перспективы для построения систем каскадного регулирования расходов воды с различными законами управления при организации суточного регулирования стока воды в ирригационных системах.

На этой основе были разработаны оригинальные датчики уровней, позволяющие изменять заданные отметки стабилизируемых уровней воды и эффективно организовывать гидравлическую связь между контролируемыми створами каналов и регуляторами сооружений независимо от разности уровней в бьефах сооружений и рельефа местности.

Вопросам разработки гидравлической регулирующей аппаратуры, предназначенной для выполнения основных операций при суточном регулировании, и построению на базе этой аппаратуры систем каскадного регулирования посвящаются следующие четыре главы настоящей работы:

IV. Системы стабилизации уровней воды в бьефах отдельных

гидротехнических сооружений.

У. Динамика процессов в системах стабилизации уровней воды.

VI. Каскадное регулирование расходов воды на ирригационных системах.

VII. Экспериментальные исследования процессов в системах стабилизации и каскадного регулирования расходов и уровней воды.

При суточном перерегулировании стока воды на системы каскадного регулирования возлагаются функции оперативного удовлетворения потребителей водой, исключение или сведение к минимуму непроизводительных потерь (холостых сбросов) воды, лимитирование расходов вдоль системы при недостаточной водообеспеченности или, в случае необходимости, перемещение резервных объемов воды вверх или вниз по системе, автоматическая защита от переполнения или опорожнения каналов.

Для построения систем каскадного регулирования, способных осуществить перечисленные выше операции, потребовалась в первую очередь разработка гидравлических регуляторов с изменяемым заданием стабилизируемых уровней и унифицированными датчиками, которые позволяют обеспечить стабилизацию уровней в различных бьефах на заданных отметках с одновременной защитой от переполнения каналов. Вопросы выбора основных параметров этой аппаратуры и методов ее настройки привели к исследованию процессов динамики резервирования и перекачки объемов воды из бьефа в бьеф при взаимосвязанной работе автоматизированных гидротехнических сооружений и суточном регулировании расходов воды. Остановимся кратко на основных результатах ра-

I. Объекты регулирования ирригационных систем

Многообразие гидротехнических сооружений, их расположение накладывают серьезные ограничения на возможность выделения типовой оросительной системы, структура и конфигурация которой зависят в значительной мере от рельефа местности, других особенностей и условий районов орошаемого земледелия.

Почти в каждой системе можно обнаружить каналы с малыми, большими уклонами, ограниченными гидротехническими сооружениями, которые в различном своем сочетании образуют любую другую ирригационную систему. Рассмотрение элементов оросительных систем позволило сделать выбор типового объекта регулирования, изучение свойств которого дает возможность анализировать работу целых участков систем.

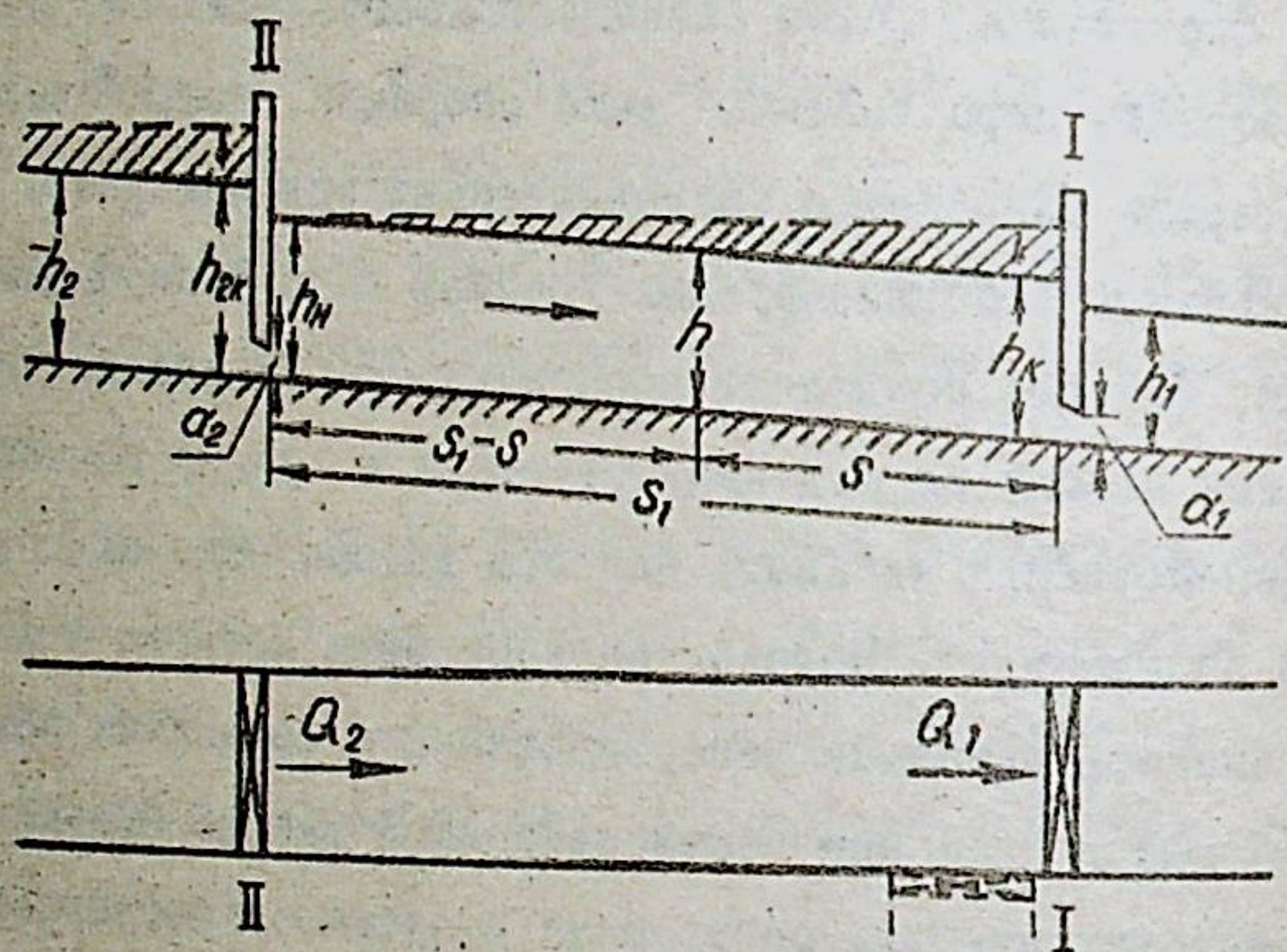


Рис. I

С точки зрения конкретизации понятия объекта регулирования представляет интерес участок канала (рис. I), ограниченный вододельными, перегораживающими или сопрягающими сооружениями, и как частные случаи: канал, ограниченный сверху или снизу сооружениями или участок канала без перегораживающих сооружений между водовыпусками. К числу обобщенных координат объекта регулирования относятся отклонения глубины наполнения Δh и скорости течения Δv в любом створе между ограничивающими сооружениями, а за внешние возмущающие или управляющие воздействия принимаются отклонения Δa_k , Δa_k затворов на границах участка и отклонения глубины накопления Δh_2 , Δh_1 со стороны верхнего и нижнего бьефов соответственно верхнего или нижнего перегораживающих сооружений.

Динамика процессов в объекте регулирования описывается уравнениями (I) с привлечением граничных условий, которые формируют характер волновой передачи расходов, влияют на квази-установившееся движение воды в рассматриваемом канале. Показано, что математическая модель объекта регулирования характеризуется дробно-иррациональными передаточными функциями, из которых при нулевых начальных условиях можно выделить четыре функции, описывающие влияние прямых и обратных отраженных и неотраженных волн на протекание переходных процессов:

$$V_1(p) = \frac{ap + \beta}{p + c_2 - d_2 F(p)} \exp \tau_1 [p - F(p)]; \quad V_2(p) = \frac{p + c_2 + d_2 F(p)}{p + c_2 - d_2 F(p)} \exp 2\tau_1 [p - F(p)];$$

$$V_3(p) = \frac{p + c_1 - d_1 F(p)}{p + c_1 + d_1 F(p)} \exp 2\tau_2 [p - F(p)]; \quad V_4(p) = \frac{ap + \beta}{p + c_1 + d_1 F(p)} \exp \tau_2 [p - F(p)];$$

где $F(p) = \sqrt{(p+a)(p+b)}$, $a, \beta, \alpha, b, c_1, d_1, c_2, d_2, \tau_1, \tau_2$ — определяются гидравлическими параметрами каналов и сооружений.

Передаточные функции $V_1(p)$, $V_2(p)$ учитывают влияние граничных условий в начале канала, а $V_4(p)$, $V_3(p)$ — соответственно в конце его. Первые отраженные волны характеризуются функциями $V_1(p)V_3(p)$ и $V_2(p)V_4(p)$. Передаточные функции всех последующих отраженных волн включают множителем функцию

$V_1(p)V_3(p)$, возведенную в степень, где показатель степени зависит от количества прошедших отраженных волн до рассматриваемого момента времени в контролируемом створе. При начальных нулевых условиях уравнение динамики в изображениях для отклонения глубины в произвольном створе канала имеет вид

$$Z \left\{ 1 - V_2(p)V_3(p) \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{20})p] \right\} =$$

$$= V_1(p) \left\{ V_3(p) \frac{\gamma_1 \gamma_2}{x_2} \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{20})p] - \frac{\gamma_1}{x_2} \exp(-\tau'_1 p) \right\} (N_n A_n + R_n Z_2) +$$

$$+ V_4(p) \left\{ V_2(p) \frac{\gamma_1 \gamma_2}{x_1} \exp[-(\tau'_1 + \tau'_{20})p] - \frac{\gamma_2}{x_1} \exp(-\tau'_2 p) \right\} (N_k A_k + R_k Z_1),$$

(2)

где γ_1, x_1, x_2 — коэффициенты, определяющие режимы работы каналов и сооружений,

$$Z_1 \rightarrow \zeta_1 = \frac{\Delta h_1}{h_1}; Z_2 \rightarrow \zeta_2 = \frac{\Delta h_2}{h_2}; A_n \rightarrow \alpha_n = \frac{\Delta a_n}{a_n}; A_k \rightarrow \alpha_k = \frac{\Delta a_k}{a_k};$$

$a_k, \Delta a_k$ и $a_n, \Delta a_n$ — соответственно открытия затворов, их приращения для нижнего и верхнего сооружений,

N_k, N_n, R_k, R_n — коэффициенты, отражающие степень влияния возмущающих воздействий.

Чем короче участок канала между перегораживающими сооружениями, тем значительнее влияние множителя

$\left\{ 1 - V_2(p)V_3(p) \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{20})p] \right\}$
на формирование нестационарного движения воды.

Чистое запаздывание движения фронта прямых и обратных, неотраженных и отраженных волн характеризуется функциями $\exp(-\tau'_1 p)$, $\exp(-\tau'_2 p)$, $\exp[-(\tau'_1 + \tau'_{20})p]$, $\exp[-(\tau'_2 + \tau'_{10})p]$.

Изменение инерционности процесса вдоль канала определяется множителями $\gamma_1 \exp \tau_1 [p - F(p)]$, $\gamma_2 \exp \tau_2 [p - F(p)]$,

$$\gamma_1 \gamma_2 \exp(\tau_{20} + \tau_1) [p - F(p)], \gamma_1 \gamma_2 \exp(\tau_{10} + \tau_2) [p - F(p)].$$

Для приведенных выше частных случаев объекта регулирования, когда участок канала имеет значительную протяженность, уравнение (2) упрощается и принимает вид

$$Z = V_1(p) (N_n A_n + R_n Z_2) \left[-\frac{\gamma_1}{x_2} \exp(-\tau'_1 p) \right],$$

(3)

или

$$Z = V_4(p) (N_k A_k + R_k Z_1) \left[-\frac{\gamma_2}{x_1} \exp(-\tau'_2 p) \right]$$

(4)

в зависимости от наличия тех или иных возмущающих воздействий. Однако, даже для этих уравнений практически получить оригиналы по изображению Z не удастся, за исключением некоторых частных случаев, когда решение отличается чрезвычайной сложностью и может служить лишь только эталоном сравнения для приближенных решений.

П. Статические характеристики объектов регулирования ирригационных систем

Анализ нестационарных процессов движения воды в каналах, описанных выделенными выше передаточными функциями, неразрыв-

но связан с оценкой статических характеристик каналов и сооружений, режимов установившегося движения воды.

В связи с этим рассматривается влияние граничных условий на формирование неустановившегося движения воды, что позволяет выработать требования к проектированию рациональных конструкций гидротехнических сооружений с точки зрения качества процессов регулирования.

Показано, что задача определения статических характеристик объекта регулирования в большинстве случаев сводится к построению универсальных графических зависимостей для определения по трем переменным H, h_s, a (глубина наполнения верхнего бьефа, нижнего бьефа и открытие затвора для каждого сооружения) режима истечения, глубины подтопления в нижнем бьефе, а также значений част. их производных от расхода по этим переменным для соответствующего установившегося режима работы сооружений и канала. На рис. 2 приведен один из графиков (область свободного и затопленного истечения обозначены соответственно А и Б). Эффективность графических построений определяется выбором отношений переменных $\frac{a}{H}$ и $\frac{h_s}{H}$, который позволяет сократить до минимума количество графиков и охватить всевозможные случаи сочетания переменных H, h_s, a , так как соотношения $\frac{a}{H}$ и $\frac{h_s}{H}$ изменяются в диапазоне от 0 до 1. На основе исследований Н. В. Жуковского закономерностей течения жидкости получены аналитические зависимости для границ областей режимов истечения воды из-под затворов, статических характеристик сооружений и неравномерного движения воды в каналах при малых возмущающих воздействиях. Неравномерность отклонения глубины

наполнения вдоль канала учитывается множителем

$$\eta_2^2 = \exp\left(-\tau_2 \frac{Lx}{h}\right),$$

который указывает на наличие либо кривой подпора, либо спада. Возрастание уклона канала приводит к увеличению затухания волны в динамике процесса при неустановившемся движении воды.

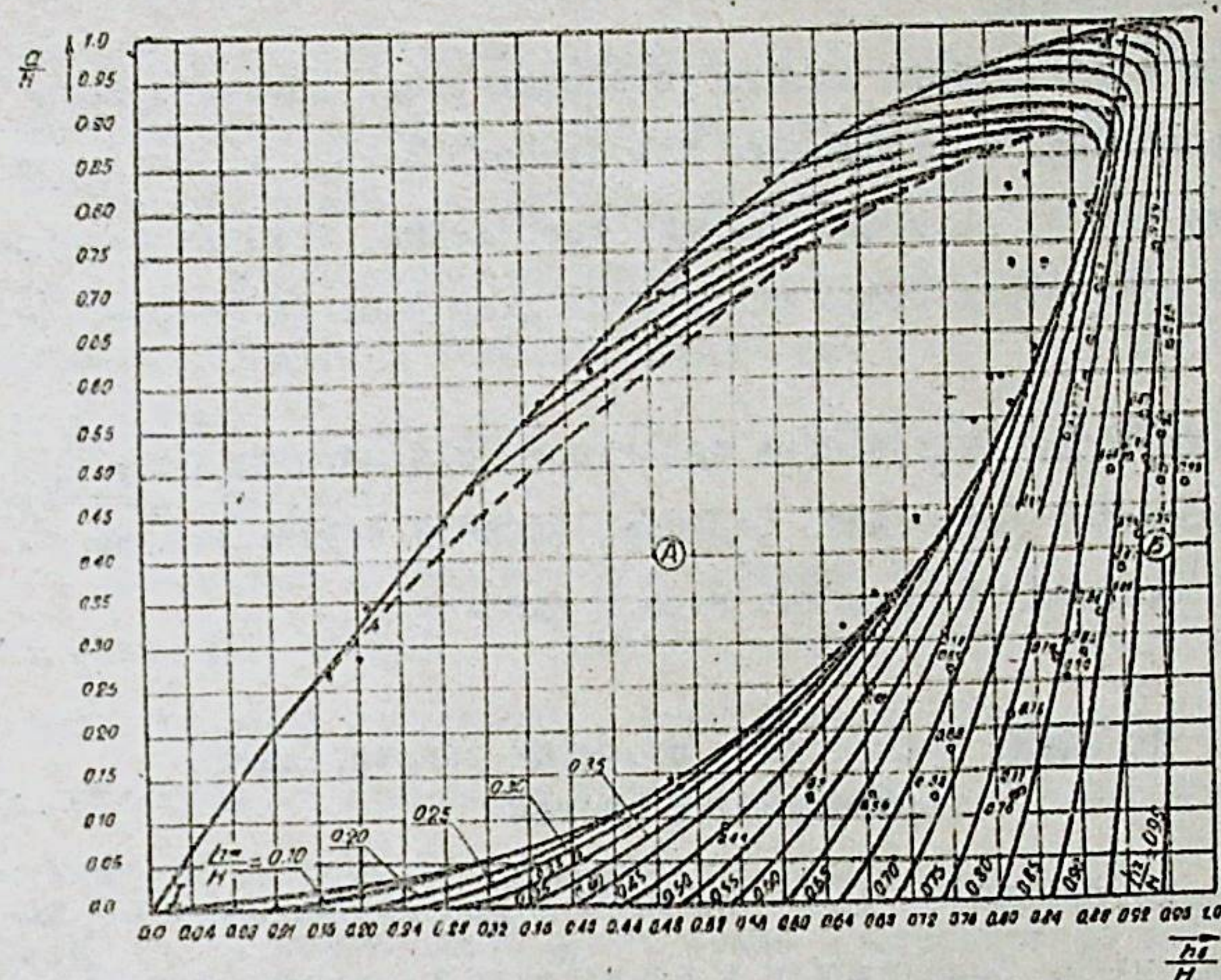


Рис. 2

Анализ влияния отраженных волн на формирование нового установившегося движения воды, если первоначальный режим был равномерный, показывает, что отклонение глубины наполнения, вызванное обратной отраженной волной, может быть больше или меньше отклонения от прямой волны в зависимости от коэффициентов граничных условий и гидравлического показателя русла χ . Отклонение глубины в статических условиях, вызванное первой

прямой, отраженной волной, меньше и противоположно по знаку отклонению от обратной волны.

Левая часть уравнения (2) не влияет на образование неравномерности движения воды в канале, а лишь уменьшает или увеличивает абсолютную величину отклонения в одинаковой степени вдоль канала.

При формировании нового установившегося движения воды после приложения возмущающего воздействия основную роль играют режимы работы перегораживающих сооружений, а также гидравлический показатель русла или производная расхода по глубине канала.

Полученные статические характеристики объекта регулирования позволяют установить характер влияния выделенных передаточных функций на движение воды в каналах.

III. Динамика процессов в объектах регулирования ирригационных систем

Неустановившееся движение воды в рассматриваемом объекте регулирования формируется в результате наложения прямых и обратных отраженных и неотраженных волн. Для оценки общей картины неустановившегося движения воды были рассмотрены свойства ранее выделенных передаточных функций. Наиболее простая картина неустановившегося движения наблюдается в случае бьефа значительной протяженности с возмущающими воздействиями, приложенными на верхнем или нижнем перегораживающих сооружениях, когда динамика процесса описывается передаточными функциями $V_1(p)$ или $V_4(p)$ соответственно для прямой и обратной неотраженных волн.

Исследование свойств передаточных функций рассматриваемых объектов с распределенными параметрами эффективно проводить с использованием частотного метода анализа качества процессов регулирования.

В зависимости от значений коэффициентов a, b, c, d выделенные передаточные функции могут характеризовать как монотонные, так и колебательные процессы, причем их частотные характеристики достаточно близки к частотным характеристикам соответствующих звеньев первого или второго порядка.

Показано, что всегда коэффициенты $a > 0, b > 0, c_2 > 0$ и $d_2 > 0$ и передаточная функция $V_1(p)$ описывает монотонные переходные процессы. Доказано также, что $d_1 > 0$ и $c_1 > 0$, либо $c_1 \leq 0$ и $d_1 < -1$ и функции $V_4(p)$ соответствуют монотонные переходные процессы.

Для прямой и обратной неотраженных волн, описываемых функциями $V_1(p)$ и $V_4(p)$, величина фронта волны всегда меньше соответствующего статического отклонения и совпадает по знаку. В зависимости от граничных условий отраженные волны, характеризующиеся передаточными функциями $V_1(p)V_3(p), V_2(p)V_4(p)$ и $V_2(p)V_3(p)$, могут иметь фронт волны и статическое отклонение, не совпадающие по знаку при различном соотношении между их величинами.

Исследование монотонности процессов привело к определению возможности использования линейной интегральной оценки качества переходного процесса при разработке метода замены дробно-иррациональных дробно-рациональными передаточными функциями. Линейная интегральная оценка или инерционность процесса для монотонного процесса служит характеристикой интенсивности

его затухания и отражением свойств процесса противостоять возмущениям, направленным на изменение его показателей. В целом уравнение (2) описывает как монотонные, так и колебательные процессы, так как выделенные передаточные функции в определенном своем сочетании могут характеризовать и колебательные процессы наряду с монотонными. Это зависит от режимов работы ограничивающих перегораживающих сооружений (граничных условий).

При аппроксимации дробно-иррациональных передаточных функций сравниваются линейные интегральные оценки исходной и преобразованной функции, а также их начальные и конечные значения. Это позволило получить минимально возможный порядок уравнения и довольно равномерное распределение погрешностей вдоль кривой при отсутствии ее в трех точках.

Такие основные особенности неустановившегося движения воды в открытом канале, как волновая передача расхода воды, изменение инерционности процесса и чистого запаздывания вдоль канала, влияние отраженных волн и квази-установившееся движение учитываются в преобразованном уравнении

$$Z \left\{ 1 - W_2(p)W_3(p) \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{20})p] \right\} =$$

$$= W_2(p) \left\{ W_3(p) \frac{T_{10}T_{12}}{x_2} \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{12})p] - \frac{T_{11}}{x_2} \exp(-\tau'_{11}p) \right\} (N_A A_N + R_N Z_2) +$$

$$+ W_4(p) \left\{ W_2(p) \frac{T_1 T_{20}}{x_1} \exp[-(\tau'_1 + \tau'_{20})p] - \frac{T_2}{x_1} \exp(-\tau'_2 p) \right\} (N_A A_N + R_N Z_1), \quad (5)$$

где $W_i(p) = \frac{L_i p + K_i}{T_i p + 1}$
 Определение постоянных времени T_i и коэффициентов L_i, K_i

передаточных функций $W_i(p)$ не составляет каких-либо затруднений при заданных гидравлических параметрах каналов и сооружений. Аналитические их выражения получены в увязке со статическими характеристиками рассматриваемого типового объекта регулирования, для которых во второй и четвертой главах даны аналитические выражения и графики для практического использования.

Уравнение (5) позволяет анализировать динамику процессов в объектах регулирования с использованием аналитических методов и применением аналоговых вычислительных машин. Оно описывает неустановившееся движение в коротких и длинных бьефах, причем в случае коротких бьефов важную роль играет множитель $1 - W_2(p)W_3(p) \exp[-(\tau'_{20} + \tau'_{10})p]$, который описывает влияние всех отраженных волн, кроме первых, и указывает на условие возникновения колебательного процесса с периодом $t = \tau'_{10} + \tau'_{20}$.

В случае длинных бьефов этим множителем, как правило, можно пренебречь.

При наличии возмущающих воздействий на перегораживающих сооружениях для контролируемого створа на расстоянии $s_1 \gg (s_1 - s)$ уравнение (5) преобразуется в следующее

$$Z = -W_4(p) (N_A A_N + R_N Z_2) \frac{T_1}{x_2} \exp(-\tau'_1 p) \quad (6)$$

а для створа при $s_1 \gg s$ при тех же возмущениях получим

$$Z = -W_4(p) (N_A A_N + R_N Z_1) \frac{T_2}{x_1} \exp(-\tau'_2 p) - \frac{K_1}{T_1 p + 1} \left[\frac{T_1}{x_2} \exp(-\tau'_1 p) - \right.$$

$$\left. - W_3(p) \frac{T_{10} T_{12}}{x_2} \exp[-(\tau'_{10} + \tau'_{12})p] \right] (N_A A_N + R_N Z_2).$$

(7)

Уравнение (6) показывает, что возмущающие воздействия, приложенные в створе нижнего перегораживающего сооружения, не оказывают влияния на формирование неустановившегося движения воды в створе на расстоянии s (рис.3). Отраженные

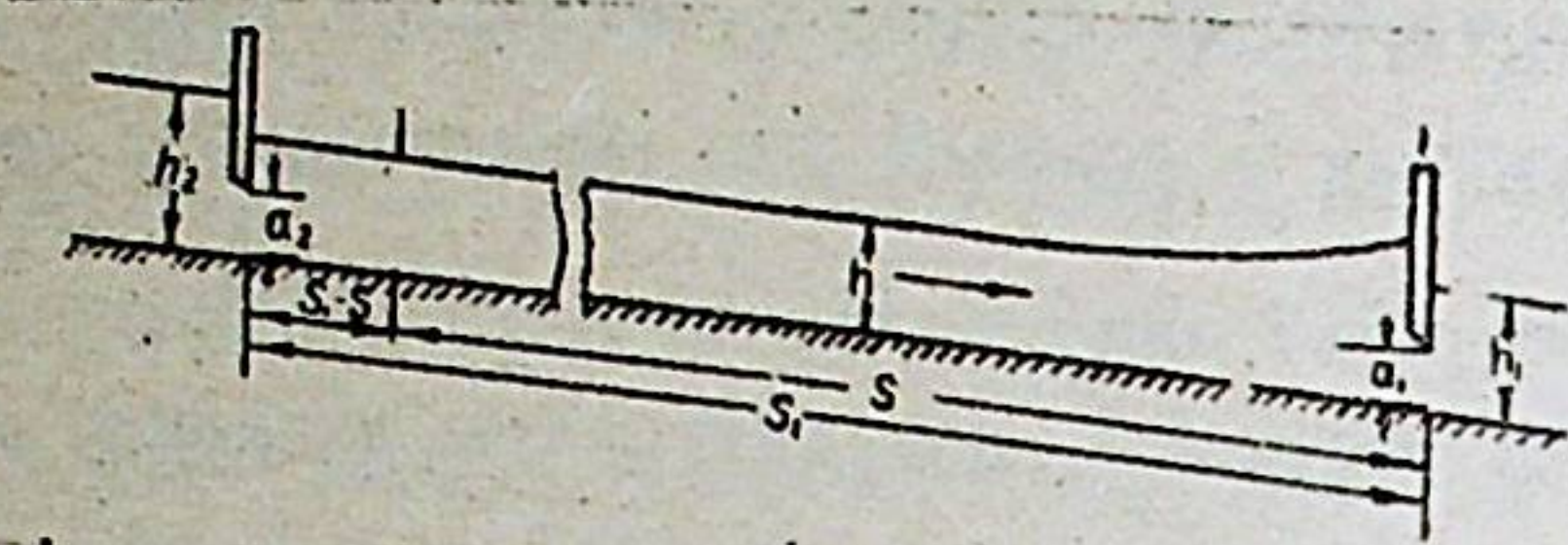


Рис.3

волны также не влияют на динамику процесса. Это отвечает случаям, когда кривые подпора или спада не распространяются на расстояние s и имеется участок равномерного движения воды значительной протяженности, так что обратная волна затухает на расстоянии s_1 . Если контролируемый створ находится в зоне подпора нижнего перегораживающего сооружения и $s_1 \gg s$ (рис.4), то отраженные волны от верхнего сооружения, возникающие от возмущающего воздействия на нижнем сооружении, не приходят в створ наблюдения, а прямая и отраженная обратная волны имеют размытый фронт. В связи с этим величиной фронта прямой волны в расчетах можно пренебречь. В уравнении (7) это учитывается передаточной функцией $W_1(p)$.

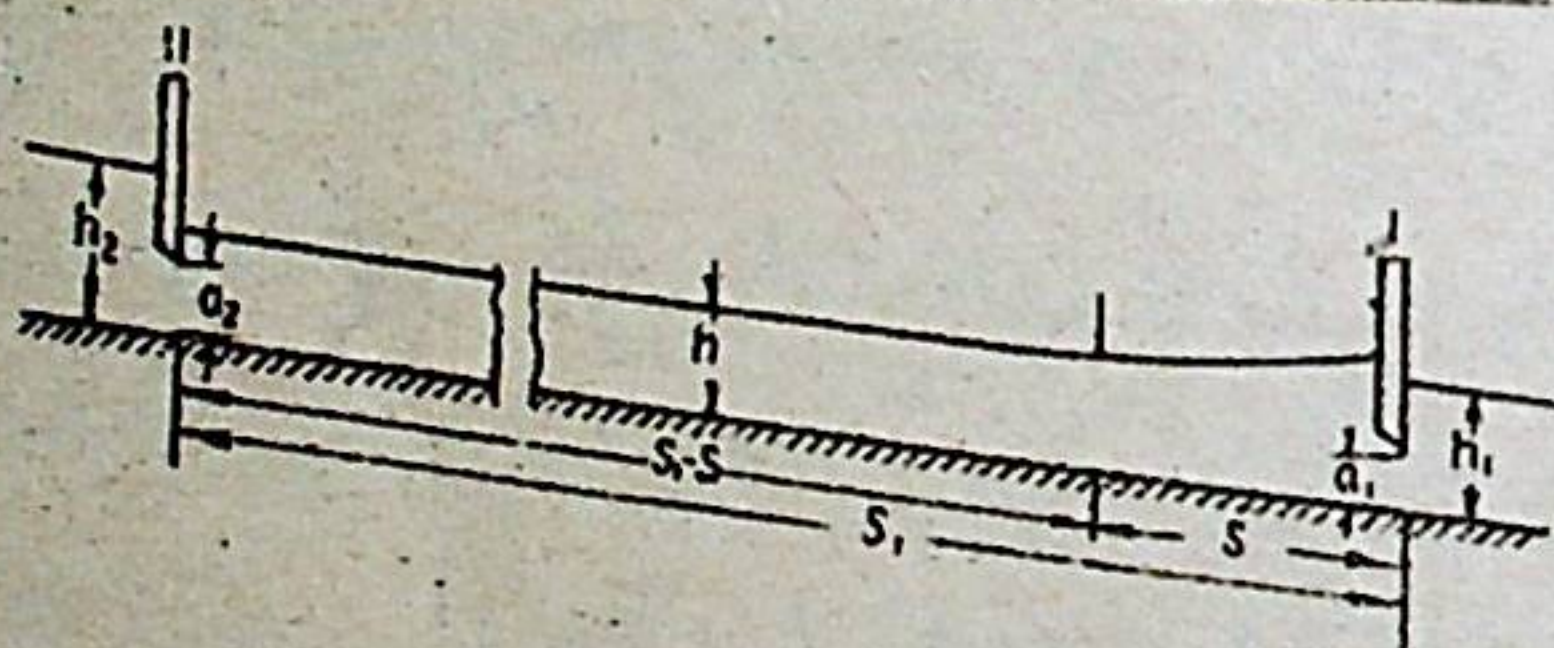


Рис.4

Решения уравнения (5) дают вполне удовлетворительное совпадение с решениями для некоторых частных случаев исходных уравнений (2), когда удалось взять оригинал для изображения, и отличаются своей простотой. На рис.5 показаны сплошной линией кривые, отражающие точные решения, а штриховой - приближенные. Кривые 1 и 2 соответственно характеризуют изменение уровней в нижнем бьефе сооружения и в створе на расстоянии 1000 м.

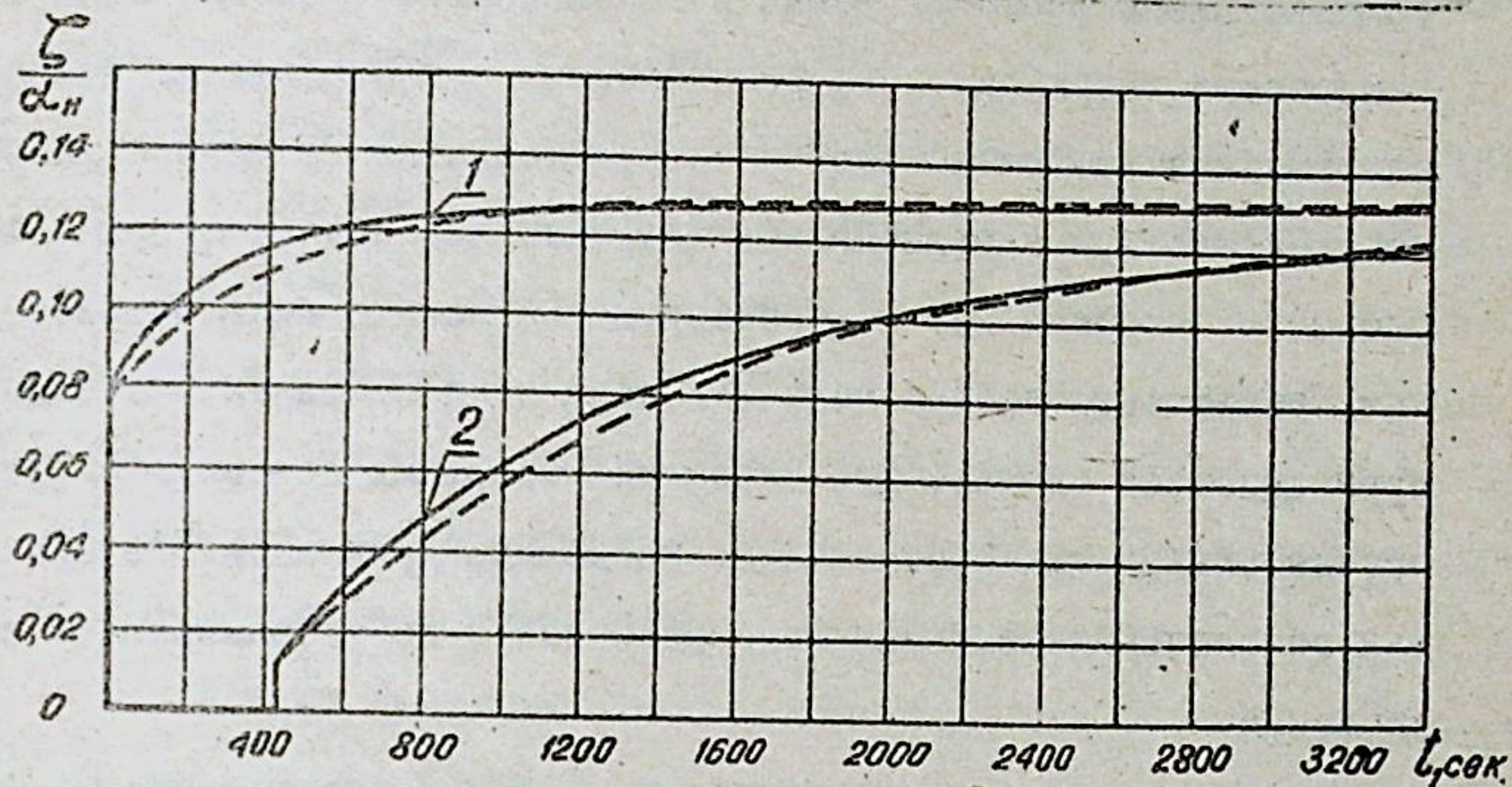


Рис.5

Разработанная математическая модель типового объекта регулирования является базой для исследования динамики процессов в системах каскадного регулирования расходов воды с целью выбора аппаратуры автоматики и решения вопроса о рациональной структуре автоматизированных оросительных систем.

IV. Системы стабилизации уровней воды в бьефах отдельных гидротехнических сооружений

Выбор средств аппаратуры гидравлической автоматики для стабилизации уровней в нижних бьефах сооружений чрезвычайно ограничен. Известный регулятор прямого действия (французские фирмы Нейрпик и Согреак) с одним устойчивым состоянием, который может быть использован в системах каскадного регулирования, не реализует ряда важнейших операций для суточного перерегулирования расходов воды. В связи с этим возникла задача разработки гидравлических регуляторов, обеспечивающих изменение режимов работы каналов и сооружений с целью перерегулирования стока при неравномерных графиках водоподдачи и водопотребления, ограничение или форсирование подачи воды потребителям, увеличение забора воды в голове и на основных участках ирригационной системы для создания резервных объемов. Статическая ошибка при стабилизации не должна превышать $\pm 0,015$ и для обеспечения рационального размещения перегородивающих сооружений.

Одновременно встал вопрос о создании каналов обратной связи, обеспечивающих установку датчиков на сооружениях как с затопленным истечением воды в нижнем бьефе, так и при наличии сопрягающих сооружений типа сосредоточенного перепада или быстротока и в случаях, когда датчик по какой-либо причине должен находиться на расстоянии сотен метров от гидравлического регулятора, использующего энергию потока воды без предварительного ее преобразования.

На основе этих требований были разработаны гидравлические регуляторы стабилизации уровней воды нижнего бьефа и с

защитой от переполнения каналов. Эксплуатация показала, что они выполняют все технологические операции в системах каскадного регулирования и обладают необходимой надежностью, обеспеченной защитой от переполнения, отсутствием сальниковых уплотнений в гидравлической системе обратной связи датчика, наличием промывных и др. устройств в затворах. Использование эластичных мембран в качестве клапана исполнительного элемента и в преобразователе давления датчика позволило обеспечить надлежащие условия длительной эксплуатации регуляторов в потоке загрязненной оросительной воды.

Наряду с повышением надежности работы регуляторов были рассмотрены вопросы унификации отдельных узлов регуляторов с целью использования гидравлического усилителя, каналов обратной связи, гидравлического затвора, датчиков в схемах стабилизации уровней верхнего, нижнего бьефов и нижнего бьефа с автоматическим переходом на стабилизацию уровня верхнего бьефа в случае превышения соответствующих отметок.

Анализ установившихся режимов работы автоматизированных гидротехнических сооружений позволил выбрать рациональную компоновку датчиков и исполнительных элементов гидравлических регуляторов, представленных затворами прислонного типа, в ряде случаев оборудованных противовесами или герметическими камерами. Такие затворы обеспечивают повышенную пропускную способность при тех же открытиях по сравнению с плоскими или сегментными в пределах от 80 до 20% в зависимости от ширины пролета сооружений.

Предложенная методика расчета и проектирования систем

стабилизации уровня воды в бьефах отдельных сооружений позволяет выбрать оптимальные габариты металлоконструкций регуляторов, определить гидродинамические воздействия потока воды на элементы регуляторов, произвести расчет коэффициентов усиления и задать требуемое быстродействие при известных пределах отклонения регулируемых расходов.

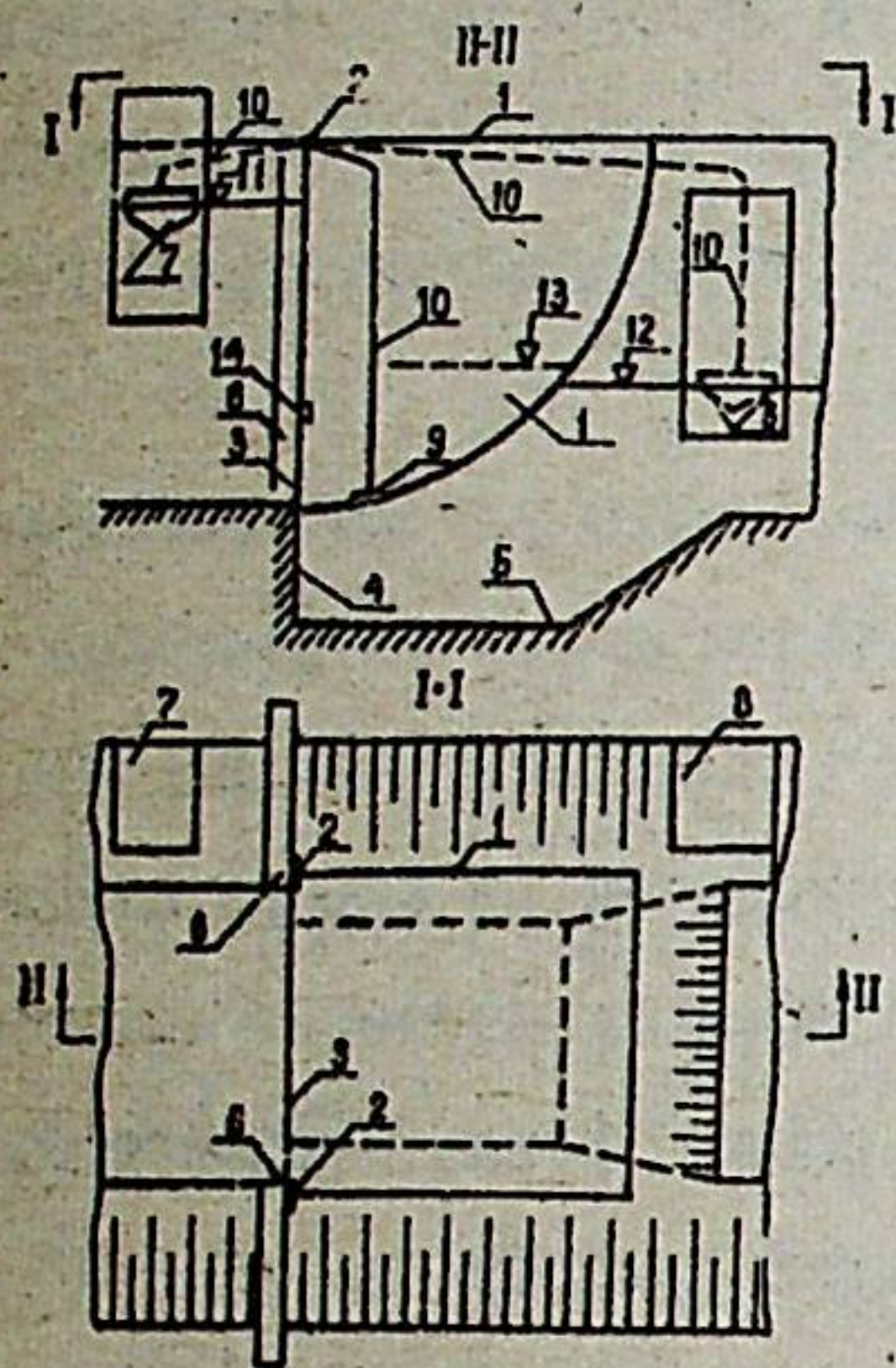


Рис. 6

На рис. 6 приведена схема регулятора стабилизации уровня нижнего бьефа I2 с защитой от переполнения канала. Датчики 7, 8 связаны трубопроводом 10 малого диаметра с клапаном 9, регулирующим наполнение водой затвора I, который вращается относительно оси 2. Вода в затвор поступает через отверстие I4 с фильтром в напорной грани 3. Если уровень верхнего бьефа превысит отметку максимального уровня II, регулятор переходит на стабилизацию уровня верхнего бьефа.

Наряду с гидравлическими регуляторами разработаны оригинальные средства пневмогидравлической аппаратуры для систем каскадного регулирования с источниками сжатого воздуха, использующих кинетическую и потенциальную энергию потока воды на гидротехнических сооружениях. Системы пневмогидравлической автоматики не подвержены влиянию твердого стока. Область их применения распространяется на системы каскадного регулирова-

ния, включающие каналы с большими уклонами значительной протяженности. Эксплуатация средств пневмогидравлической аппаратуры указывает на широкие перспективы их применения в ирригации. Опыт эксплуатации участков экспериментально-производственных систем каскадного регулирования показал, что для эффективной реализации операций суточного регулирования расходов воды наряду с гидравлическими регуляторами должны применяться пневмогидравлические.

Разработанные средства гидравлической и пневмогидравлической аппаратуры нашли широкое применение в производстве, зарегистрированы Комитетом по делам изобретений и открытий и частично запатентованы за рубежом.

У. Динамика процессов в системах стабилизации уровня воды

Показано, что система стабилизации уровня воды в нижнем бьефе гидротехнического сооружения с защитой от переполнения является основным элементом для реализации каскадного регулирования с минимумом непроизводительных потерь. Анализ такой системы позволяет судить о качестве процессов изменения режимов работы сооружений и каналов, а для бьефов значительной протяженности, выяснить динамику изменения расходов и уровня воды вдоль каналов во времени с целью ориентации систем диспетчерского управления и согласования графика неравномерной суточной подачи воды с месторасположением потребителей вдоль каналов.

Вопросы добегающих основных расходов, их форсировки в целях своевременного обеспечения потребителей необходимыми

нормами воды получили достаточное освещение в результате разработки математических моделей отдельных систем стабилизации уровней воды.

Медленно протекающие процессы в объекте регулирования позволяют пренебречь инерционностью движения затвора, волновыми процессами в обратной связи регулятора и рядом нелинейных зависимостей, что значительно упрощает инженерную методику расчета. Возможность использования упрощенной модели регулятора подтверждается исследованиями процессов стабилизации уровней воды на натуральных системах. Расчет регулятора в большинстве случаев требует определения гидродинамического давления воды на напорную грань затвора, в связи с чем отпадает необходимость проводить трудоемкие расчеты, сложный монтаж и настройку регуляторов на сооружениях, как это имеет место для регуляторов прямого действия с одним устойчивым состоянием. Наличие запаса мощности регуляторов позволяет повысить надежность систем стабилизации в сложных условиях работы ирригационных сооружений.

Исследование систем автоматической стабилизации уровней нижнего бьефа выявило ряд особенностей, которые играют определенную роль в формировании неустановившегося движения воды. Это возможность возникновения автоколебательных режимов с увеличением расстояния от створа датчика до сооружения. Автоколебания, вызываемые распределенностью процессов, можно легко обнаружить и предупредить, если правильно выбрать коэффициент усиления регулятора меньше критического его значения. Величина критического коэффициента усиления регулятора зависит от

створа расположения датчика и инерционности процессов в обратной связи регулятора.

Существует область выбора оптимальных коэффициентов регуляторов в системах стабилизации. Значительное уменьшение коэффициентов приводит к увеличению динамических отклонений стабилизируемых уровней, что может вызвать потерю устойчивости в системе каскада и, так называемую, "раскачку" бьефов. Автономные автоколебательные процессы возникают при значениях коэффициентов более критических и могут допускаться в системах, если амплитуда колебаний не превышает допустимых значений. Такие колебания гасятся на протяжении одного бьефа и не влияют на качество работы системы каскадного регулирования расходов воды.

VI. Каскадное регулирование расходов воды на ирригационных системах

Рассматриваются комбинированные системы каскадного регулирования воды со стабилизацией уровней в нижних бьефах перегораживающих сооружений с защитой от переполнения каналов, когда обратная связь между всеми или частью перегораживающих сооружений осуществляется через подпор воды. Непроизводительные потери воды практически исключаются в таких системах, если резервные емкости каналов и подключаемых водоемов обеспечивают накопление объемов воды при неравномерных графиках водопотребления и водоподачи. При этом водовыпуски в хозяйстве контролируются стабилизаторами расхода (модулями), диспетчером системы или линейным персоналом.

Основной задачей расчета комбинированных систем является

ся согласование резервных емкостей каскада с характером неравномерного графика водопотребления, суточного и недельного колебания стока в каналах, выработка условий изменения расхода потребителей и определение быстродействия регулирующей аппаратуры, исключающего дефицит и холостые сбросы в процессе накопления и сбрасывания резервных объемов воды. При недостаточной водообеспеченности срочительных систем ограничение потребителей может осуществляться регуляторами перегораживающих сооружений.

Динамика процессов накопления и сбрасывания резервных объемов воды обуславливает выбор быстродействия регулирующей аппаратуры, пределы ограничения возмущающих воздействий на водовыпусках системы, оптимальную протяженность отдельных бьефов. Для расчета необходимо выбирать бьеф с наиболее тяжелыми условиями работы (максимальное удаление крупного водопотребителя, минимальные резервные емкости и запасы в дамбах, резкое изменение расхода и т.д.).

Быстродействие других регуляторов обосновывается условиями работы бьефа с наиболее тяжелым режимом, при этом, естественно, имеется определенный запас. Такой подход к проектированию систем каскадного регулирования позволяет значительно упростить расчет взаимосвязанной работы автоматизированных гидротехнических сооружений. Следует отметить, что в ряде случаев, когда нельзя выбрать один бьеф с наиболее сложными условиями работы, может потребоваться расчет нескольких бьефов с использованием аналоговой вычислительной машины.

Изменение глубины наполнения в конечном створе расчетного бьефа при возмущающем воздействии, приложенном на сооруже-

нии в этом же створе, описывается выражением

$$\Delta h_k = \frac{\omega}{B} \left[\frac{g\omega}{v - \mu \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - \frac{v}{v - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \right] N_k \alpha_k, \quad (8)$$

откуда следует, что увеличение величины возмущения вызывает уменьшение объема накопления или сбрасывания резерва воды в канале при одинаковом отклонении Δh_k , это показывает, что резервные объемы не всегда могут использоваться полностью, поэтому для эффективного резервирования воды в каналах необходимо строго соблюдать ограничение резко меняющихся расходов и использовать принцип очередности включения водовыпусков.

Изменение возмущающего воздействия во времени позволяет повысить степень использования резервных объемов воды, что видно из выражения

$$\Delta h_k = \frac{\omega}{B} \left[\frac{g\beta}{v - \mu \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \frac{v}{v - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \right] N_k \alpha_k, \quad (9)$$

где τ — время перемещения затвора сооружения,
 μ — коэффициент, характеризующий режим работы канала.

Условие согласования возмущений в расчетном бьефе системы каскадного регулирования определяется соотношением

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_n} = \gamma_{10} \frac{x_1}{x_2} \frac{k_{1k} k_{3k}}{k_{4k}} \frac{N_n}{N_k}$$

При одновременном управлении затворами (перемещение резкое) верхнего и нижнего перегораживающих сооружений (например, в схеме двойного регулирования уровней) отклонение в конечном

створе описывается выражением

$$\Delta h_k = \frac{h}{x_1} N_k \alpha_k \left\{ \frac{k_{4k}}{k_{1k} k_{3k}} \left[\left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) \left(\frac{L_{3k}}{T_{3k}} - \frac{k_{3k}}{T_{3k}} T_{1k} - 1 \right) \exp \left(- \frac{t - \tau'_{10}}{T_{1k}} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - k_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} \tau'_{10} + T_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} \left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) + k_{3k} \left(\frac{L_{3k}}{T_{3k}} - 1 \right) \right] - \frac{L_{4k}}{T_{4k}} \right\} \quad (10)$$

При управлении за период τ верхним сооружением с запаздыванием τ'_{20} по отношению момента приложения возмущения на нижнем, отклонение глубины наполнения определяется

$$\Delta h_k = - \frac{h}{x_1} N_k \alpha_k \left\{ \frac{k_{4k}}{k_{1k} k_{3k}} \left\{ \frac{T_{1k}}{\tau} \left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) \left(\frac{L_{3k}}{T_{3k}} - T_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} - 1 \right) \left(1 - \exp \frac{\tau}{T_{1k}} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp \left[- \frac{t - (\tau'_{10} + \tau'_{20})}{T_{1k}} \right] + k_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} (\tau'_{10} + \tau'_{20}) + 0,5 \tau k_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} - \right. \right. \\ \left. \left. - T_{1k} \left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) \frac{k_{3k}}{T_{3k}} - k_{1k} \frac{L_{3k}}{T_{3k}} + k_{3k} \right\} + \frac{L_{4k}}{T_{4k}} \right\} \quad (11)$$

Здесь индекс "к" относится к конечному створу.

Если известен график работы водовыпусков или насосных станций заранее, то управление верхними перегораживающими сооружениями можно вести с предварением за время τ . Для рассматриваемого расчетного бьефа при возмущении α_k , приложенном с запаздыванием τ'_{20} относительно управления α_k , отклонение в крайнем створе будет определяться выражением

$$\Delta h_k = \left\{ \frac{k_{4k}}{k_{1k} k_{3k}} \left[\left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) \left(\frac{L_{3k}}{T_{3k}} - \frac{k_{3k}}{T_{3k}} T_{1k} - 1 \right) \exp \left(- \frac{t - \tau'_{10}}{T_{1k}} \right) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - k_{1k} \frac{k_{3k}}{T_{3k}} \tau'_{10} + \frac{k_{3k}}{T_{3k}} T_{1k} \left(\frac{L_{1k}}{T_{1k}} - k_{1k} \right) + k_{1k} \left(\frac{L_{3k}}{T_{3k}} - 1 \right) \right] - \frac{L_{4k}}{T_{4k}} + \frac{k_{4k}}{T_{4k}} \tau'_{20} \right\} \frac{h}{x_1} N_k \alpha_k. \quad (12)$$

Из анализа всех вариантов управления следует, что наименьшее допустимое изменение расхода соответствует системам стабилизации уровней воды в нижних бьефах перегораживающих сооружений, однако, настройка и эксплуатация таких систем проще, чем управление сооружениями одновременно или с предварением по отношению момента приложения возмущающего воздействия, так как в последних случаях требуется точное согласование изменения расхода на всех вышележащих сооружениях каскада, что представляет значительные трудности при тарировке каналов для различных режимов работы.

В основу метода расчета комбинированных систем каскадного регулирования положена оценка величины отклонения Δh_k глубины наполнения в крайнем нижнем створе. Амплитуда его не должна превышать допустимую величину $[\Delta h_k]$, которая выбирается исходя из запаса в дамбах. Расчет позволит установить скорость перемещения затвора на верхнем сооружении рассматриваемого бьефа и в случае дефицита или холостого сброса воды наложить ограничения на величины и порядок прикладываемых возмущающих воздействий. При этом может рассматриваться вопрос изменения резервных объемов в виде увеличения протяженности бьефа или подключения дополнительного водоема к системе каскадного регулирования.

Проверка выполнения неравенства $\Delta h_k < [\Delta h_k]$ происходит по этапам во времени, для которых даны соответствующие аналитические выражения по форме аналогичные (9), (10), (11). При вычислениях резервных объемов воды в случае глубокого подпора воды в бьефах каскада необходимо учитывать нелинейные зависимости, определяемые квадратами и произведениями приращений Δh и ΔV , так называемым коэффициентом γ , который определяется из выражения

$$\gamma = \frac{\left(\frac{h}{h+\Delta h}\right)^2 \left(\frac{Q+\Delta Q}{Q}\right)^2 - 1}{2 \frac{\Delta Q}{Q} - x \frac{\Delta h}{h}}$$

где Q и ΔQ - расход и его приращение,
 x - гидравлический показатель русла.

Коэффициент γ вводится поправкой к уклону равномерного движения воды γ .

Теоретические и экспериментальные исследования комбинированных систем каскадного регулирования показали, что бьефы протяженностью менее 500 м нерациональны с точки зрения ухудшения качества процессов стабилизации уровней воды. Повышения степени устойчивости можно добиться уменьшением инерционности передачи сигнала в обратной связи регуляторов путем увеличения диаметра трубопровода системы датчика до 8-10 мм. При выборе оптимальных коэффициентов усиления регуляторов в комбинированных системах каскадного регулирования с обратной связью через подпор воды между перегораживающими сооружениями необходимо учитывать протяженность бьефов, степень использования резервных емкостей каналов, характер возмущающих воздействий и допустимые динамические и статические отклонения уровней

ней.

УП. Экспериментальные исследования процессов в системах стабилизации и каскадного регулирования расходов и уровней воды

Соответствие разработанной математической модели рассматриваемых объектов регулирования процессам неустановившегося движения воды было проверено в натуральных условиях. Такие основные особенности распределенных процессов, как волновая передача расхода наряду с квази-установившимся движением воды, запаздывание во времени, достаточно учитываются предложенной математической моделью объекта регулирования, что подтверждается натурными исследованиями на ряде оросительных систем и наиболее детально на распределителях Ат-Башинского магистрального канала (Киргизская ССР).

Значительный объем экспериментальных работ был проведен на автоматизированных гидротехнических сооружениях с целью подтверждения справедливости полученных формул расчета гидравлических регуляторов стабилизации уровней, разработанных применительно к комбинированным системам каскадного регулирования расходов воды. В этой связи изучались возможности стабилизации уровней воды с гидравлической обратной связью, которая представлена трубопроводами малого сечения большой протяженности.

Исследование вопросов повышения степени надежности аппаратуры гидравлической автоматики сопровождалось анализом эксплуатационных характеристик натуральных образцов датчиков, затворов и других элементов регуляторов. Длительный срок эксплуатации гидравлических регуляторов позволил усовершенство-

вать аварийную защиту от переполнения каналов и конструктивными мерами нейтрализовать влияние плавающих предметов и наносов, транспортируемых потоком воды.

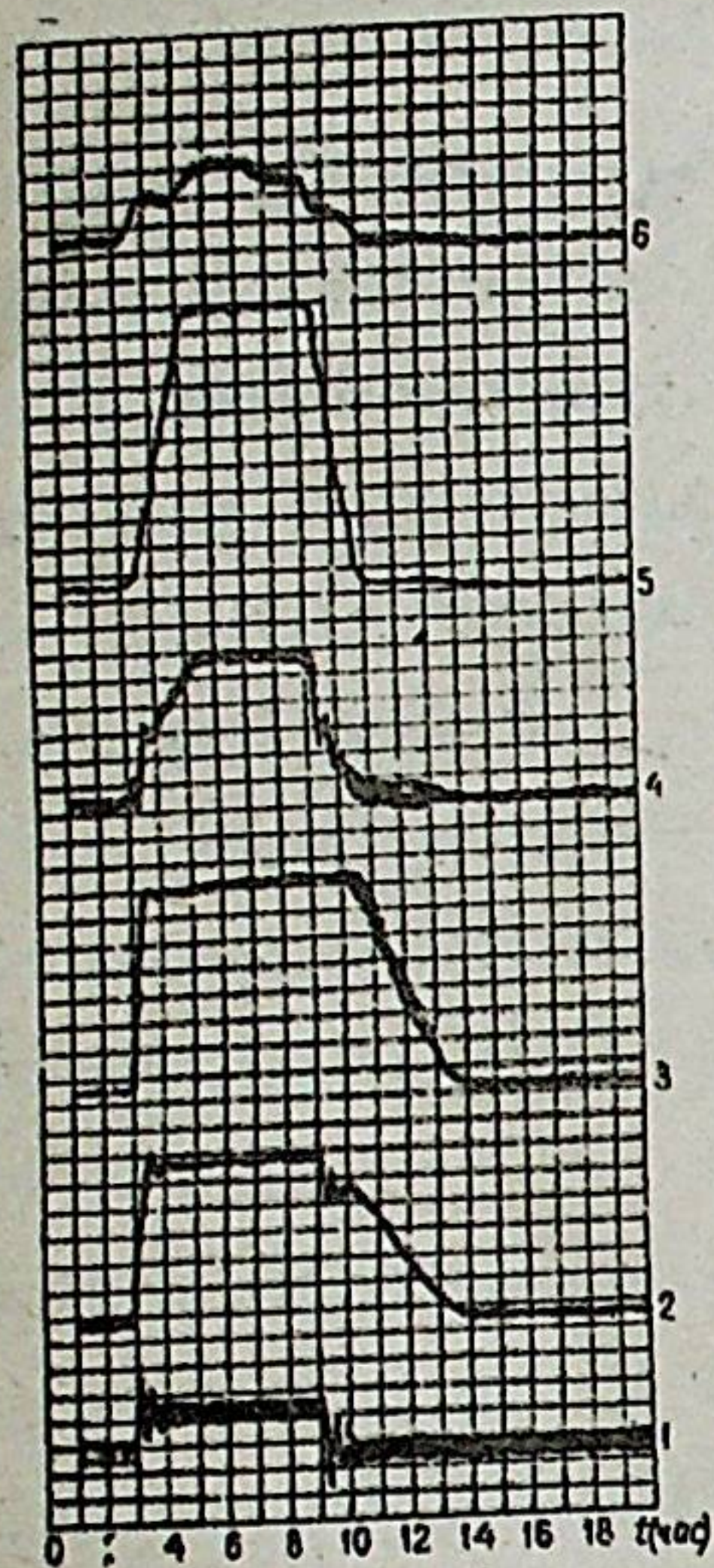


Рис. 7

На рис. 7 приведена одна из диаграмм работы участка каскада с принудительным изменением забора воды головного сооружения (кривая 1) для накопления резервных объемов воды с последующим сбрасыванием (наклонные участки кривых 3 и 5). Изменение уровней верхних бьефов промежуточных перегораживающих сооружений отражено кривыми 3 и 5, а уровней нижних бьефов соответственно кривыми 4 и 6. Участок кривой 3 с 3 час 30 мин до 10 час 30 мин, а кривой 5 с 5 час 30 мин до 9 час 30 мин характеризует работу защиты от переполнения. Накопление резервов осуществлялось сверху вниз, а сбрасывание снизу вверх за счет потребителей в конце каскада.

Наибольший объем экспериментальных исследований был сосредоточен на проверке реализации операций изменения режимов в каскаде с целью осуществления суточного регулирования расходов воды. Вопросы эффективного использования резервных емкостей каналов, лимитирование и форсировка расходов воды на отдельных участках систем каскадного регулирования представ-

ляли особый интерес в натурных испытаниях и результаты их подтвердили широкие возможности комбинированных систем при осуществлении суточного перерегулирования стока воды. При этом проводилось сопоставление теоретических и опытных данных, отражающих динамику накопления и сбрасывания резервных объемов при различном характере возмущающих воздействий и соответствующих законах управления, которые показали хорошие результаты.

ВЫВОДЫ

Задачи обеспечения оптимальных норм и сроков водопотребления, сокращения непроизводительных потерь воды в орошаемом земледелии потребовали разработки оперативных методов управления процессами водораспределения с максимальным использованием потенциальных возможностей автоматизированных гидротехнических сооружений. Привлечение соответствующего аппарата теории автоматического регулирования и управления к вопросам гидравлики каналов, сооружений и эксплуатации ирригационных объектов способствовало решению ряда указанных задач. В работе получены следующие основные выводы и результаты.

1. Анализ средств и систем управления гидротехническими сооружениями, разработанных французскими фирмами "Нейрикс" и "Согреак", показал, что они не реализуют все необходимые операции суточного или недельного регулирования расходов воды в ирригационных каналах, бассейнах перерегулирования с учетом неравномерности подачи, потребления воды и оптимальных режимов работы каналов и сооружений. Это объясняется отсутствием возможности изменения программы работы гидравлических регуляторов, которые принципиально не приспособлены к применению средств

местного или централизованного управления.

2. Оптимальное управление процессами водоподачи и водораспределения может быть успешно выполнено на базе автоматизированных гидротехнических сооружений, образующих отдельные участки и целые системы каскадного регулирования, способные сглаживать неравномерные графики водопотребления и водоподачи, обеспечивать заданную подачу, ограничение расходов, накопление и рациональное распределение воды в хозяйства согласно оперативного плана водопользования, повышение производительности труда и коэффициента использования техники при поливе за счет стабильной подачи воды потребителям.

3. Показано, что операции суточного регулирования расходов воды в ирригационных системах могут быть успешно обеспечены гидравлическими или пневмогидравлическими регуляторами стабилизации уровней воды в нижних бьефах с защитой от переполнения каналов и изменяемым заданием регулируемых уровней, для выполнения программ перестройки режимов работы сооружений.

4. Для систем каскадного регулирования разработаны гидравлические и пневмогидравлические регуляторы стабилизации уровней воды нижнего бьефа с защитой от переполнения каналов. Наличие гидравлических усилителей мощности позволяет получить погрешность в стабилизации уровней воды не более $\pm 0,015$ м, что дает возможность минимизировать число перегораживающих сооружений в каскаде. Система гидравлической обратной связи в регуляторах обеспечивает расположение датчиков регулируемых уровней в широком диапазоне по высоте и на значительных расстояниях от сооружений. Датчики приспособлены для стыковки со

средствами телемеханики. В пневмогидравлических и гидравлических регуляторах используется непосредственно энергия потока воды у гидротехнических сооружений. В зависимости от интенсивности твердого ствкла применяются гидравлические либо пневмогидравлические регуляторы. ◊

5. Широко известные методы гидравлического расчета установившихся режимов воды в каналах не могут обеспечить проектирование систем автоматического управления с учетом динамики накопления и распределения резервных объемов воды. Известные исследования процессов движения воды в условиях волн малой амплитуды применительно к задачам суточного регулирования гидроэлектрических станций не дали аналитические решения, описывающие переходные процессы в открытых каналах с учетом сил сопротивления.

Обеспечение требуемых режимов взаимосвязанной работы автоматизированных гидротехнических сооружений в системах каскадного регулирования зависит прежде всего от полноты учета свойств распределенности процессов при нестационарном движении воды в открытых каналах.

6. Предложенная математическая модель для типовых объектов регулирования отражает основные свойства неустановившегося движения воды, описываемого линейными дифференциальными уравнениями в частных производных, и обеспечивает разработку методов построения систем каскадного регулирования и алгоритмов управления процессами суточного перерегулирования расходов воды с учетом соответствующих экономических критериев, определяющих рациональные режимы эксплуатации источников орошения и обеспечения неравномерных графиков водопотребления.

Основные трудности математического анализа уравнений неустойчивого движения воды устраняются благодаря выделению элементарных передаточных функций, характеризующих монотонные процессы, и использованию свойств линейной интегральной оценки качества переходного процесса. При этом получен эффективный метод приближенного описания динамики движения воды, отличающийся значительной простотой аналитических решений.

Разработанный метод расчета неустойчивого движения воды позволяет выразить нестационарные и установившиеся процессы движения воды в общем виде как функции гидравлических параметров каналов, гидротехнических сооружений и режимов их работы. При этом основные параметры объединены в безразмерные величины, связанные зависимостями, которые позволяют построить универсальные графики, максимально упрощающие расчеты статических характеристик.

7. Установлены оптимальные условия компоновки гидравлических регуляторов в гидротехнических сооружениях и рациональная конструкция гидравлических затворов и датчиков (максимальная пропускная способность затворов при их минимальном перемещении, эффективное сопряжение потока в нижнем бьефе, наличие аварийной защиты от переполнения, противонасосные устройства).

Выделены основные факторы, влияющие на формирование процессов в системах стабилизации уровней. При составлении математических моделей систем регулирования можно пренебречь инерцией затворов и в большинстве случаев инерцией процессов в обратной связи регуляторов.

8. Показано, что существует область выбора оптимальных

коэффициентов усиления регуляторов, при которых можно избежать как автономных автоколебательных процессов, так и автоколебаний в системе взаимосвязанных бьефов каскада.

9. Дана оценка использования резервных емкостей каналов и бассейнов перерегулирования при накоплении и сбрасывании рассредоточенных объемов воды с учетом нелинейных зависимостей, характеризующих неравномерное движение воды. Определены границы допустимых колебаний расходов воды в системах каскадного регулирования и даны условия, накладываемые на графики водопотребления (порядок включения или отключения основных потребителей, дождевальных машин, насосных агрегатов и т.д.).

10. Разработанные средства гидравлической и пневмогидравлической автоматики оригинальны, запатентованы частично за рубежом и нашли широкое применение в производстве при осуществлении экспериментальных высокоэффективных систем управления взаимосвязанными гидротехническими сооружениями. Изучение опыта их эксплуатации в Киргизии, на юге Украины, Северном Кавказе позволило ряду проектных и научно-исследовательских организаций приступить к разработке технических условий и норм проектирования автоматизированных ирригационных объектов.

Эксплуатация некоторых экспериментальных систем каскадного регулирования (Киргизская ССР, Совхозный магистральный канал с пл. орошения 25 тыс. га) позволит развить предложенные методы управления и оценить фактическую технико-экономическую эффективность операций суточного регулирования с рассредоточенным резервом воды и водохранилищем в голове каскада.

Широкое освоение районов орошаемого земледелия в Сред-

ней Азии, на Украине при машинной водоподаче выдвинуло задачу об управлении каскадами насосных станций, эксплуатация которых без средств автоматики не может быть эффективной. Алгоритмы управления такими системами вытекают из рассмотренных выше математических моделей объектов и систем каскадного регулирования с учетом ограничений, накладываемых на режимы работы насосных станций и соответствующих технико-экономических критериев.

Разделы работы представлялись на Всесоюзном совещании по автоматизации производственных процессов в сельском хозяйстве (Москва, 1963 г.), Всесоюзном совещании по применению математических методов и вычислительных машин в водном хозяйстве (Москва, 1965 г.), III Всесоюзном совещании по автоматическому управлению (технической кибернетике) (Одесса, 1965 г.), Восьмом Всесоюзном совещании по пневмогидравлической автоматике (Москва, 1966 г.), III Международном конгрессе ИФАК (Лондон, 1966 г.), Всесоюзном совещании по автоматизации и телемеханизации ирригационных систем (Москва, 1967 г.), Объединенной юбилейной сессии Научного Совета по технической кибернетике ИАТ (ТК) (Москва, 1967 г.).

Основные результаты диссертаций опубликованы в следующих работах.

1. Маковский Э.Э. Система каскадного регулирования расходов воды. Управление производством. Тр. III Всесоюзного совещания по автоматическому управлению (технической кибернетике), изд-во "Наука", М., 1967.
2. Маковский Э.Э. К вопросу о моделировании переходных процессов в объектах ирригационных систем на моде-

лирующих установках непрерывного действия. Применение математических методов и вычислительных машин в гидротехнике и мелиорации, ЦБНТИ, Гипроводхоз, М., 1966.

3. Маковский Э.Э. Пневмогидравлическая автоматика ирригационных систем. Пневматические средства и системы управления. Изд-во "Наука", М., 1970.
4. Маковский Э.Э. Dynamics of Objects Irrigatory Systems Regulation, Symposium IFAC Automatic control, 1967.
5. Маковский Э.Э. Гидравлические регуляторы уровней воды. Журн. "Гидротехника и мелиорация", № 8, 1968.
6. Маковский Э.Э. Вопросы комплексной автоматизации оросительных систем. Проблемы автоматизации с.х. производства, "Колос", М., 1963.
7. Маковский Э.Э., Рожнов В.А., Волчкова В.В. О конструкции гидравлических регуляторов уровней воды. Журн. "Гидротехника и мелиорация", № 6, 1970.
8. Куротченко В.И., Маковский Э.Э. Автоматизация и телемеханизация оросительных систем. Вестник АН СССР, № 12, М., 1964.
9. Маковский Э.Э. О коэффициентах дифференциальных уравнений некоторых объектов регулирования на каналах. Тр. ИЭВХ АН Кирг.ССР, вып. 4, 1959.
10. Маковский Э.Э. Характеристики некоторых объектов регулирования с распределенными параметрами. Изв. АН Кирг.ССР, вып. 6, 1961.
11. Маковский Э.Э. Моделирование переходных процессов объектов ирригационных систем на аналоговых маши-

нах. Сб. Каскадное регулирование на ирригационных системах, изд-во "Илим", Фрунзе, 1966.

12. Маковский Э.Э., Волчкова В.В. Статистические характеристики гидравлических регуляторов расходов и уровней воды. Сб. Системы каскадного регулирования ирригационных объектов, изд-во "Илим", Фрунзе, 1967.

13. Маковский Э.Э., Закусиллов Н.А. Технико-экономические показатели автоматизации оросительных систем. Сб. Системы каскадного регулирования ирригационных объектов, изд-во "Илим", Фрунзе, 1967.

14. Маковский Э.Э., Волчкова В.В. Гидравлические регуляторы стабилизации уровней воды в системах каскадного регулирования. Сб. Каскадное регулирование на ирригационных объектах, изд-во "Илим", Фрунзе, 1970.

15. Маковский Э.Э., Волчкова В.В. Динамика распределения резервов воды в системах каскадного регулирования. Сб. Каскадное регулирование на ирригационных объектах, изд-во "Илим", Фрунзе, 1970.

16. Маковский Э.Э. Передаточные функции объектов регулирования ирригационных систем. Сб. Автоматическое регулирование расходов воды на ирригационных системах, изд-во "Илим", Фрунзе, 1970.

17. Маковский Э.Э., Волчкова В.В. Накопление и распределение резервов воды в системах каскадного регулирования. Сб. Автоматическое регулирование расходов воды на ирригационных системах, изд-во

"Илим", Фрунзе, 1970.

18. Маковский Э.Э. и Волчкова В.В. Динамика процессов в системах каскадного регулирования расходов воды. Сб. Автоматическое регулирование расходов воды на ирригационных системах, изд-во "Илим", Фрунзе, 1970.

19. Маковский Э.Э. Устройство для регулирования уровня воды в оросительном канале. Авторское свидетельство № 172075, 1965.

20. Маковский Э.Э. Устройство для регулирования расхода воды в оросительных каналах. Авторское свидетельство № 176087, 1965.

21. Маковский Э.Э. Устройство для регулирования уровня воды в оросительном канале. Авторское свидетельство № 179959, 1966.

22. Маковский Э.Э. Устройство для получения и накопления сжатого воздуха. Авторское свидетельство № 196229, 1967.

23. Маковский Э.Э. Устройство для регулирования воды в оросительных каналах. Авторское свидетельство № 197213, 1967.

24. Маковский Э.Э. Автоматический регулятор уровня воды в оросительном канале. Авторское свидетельство № 221569, 1968.

25. Маковский Э.Э. Устройство для поддержания постоянной разницы уровней воды. Авторское свидетельство № 224109, 1968.